



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

YTALLO RAFAELL TEIXEIRA DE ALBUQUERQUE

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS, MÉDIAS E
MÁXIMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ITAPICURU - BA

SÃO CRISTOVÃO – SE

2019

YTALLO RAFAELL TEIXEIRA DE ALBUQUERQUE

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS, MÉDIAS E
MÁXIMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ITAPICURU - BA

Dissertação apresentada ao Núcleo de Pós-
Graduação em Recursos Hídricos da
Universidade Federal de Sergipe como parte
dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. André Quintão de Almeida

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2019

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

A345r Albuquerque, Ytallo Rafaell Teixeira de
Regionalização de vazões mínimas, médias e máximas na
bacia hidrográfica do rio Itapicuru - BA / Ytallo Rafaell Teixeira de
Albuquerque ; orientador André Quintão de Almeida. – São
Cristóvão, 2019.
67 f. : il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade
Federal de Sergipe, 2019.

1. Recursos hídricos. 2. Balanço hidrológico. 3. Correntes
fluviais – Medição. 4. Bacias hidrográficas. 5. Itapicuru, Rio, Bacia
(BA). I. Almeida, André Quintão de, orient. II. Título.

CDU 556.16.045(282.281)(813.8)



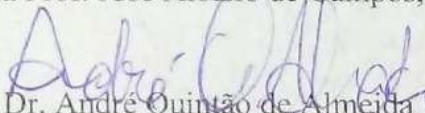
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS
HÍDRICOS

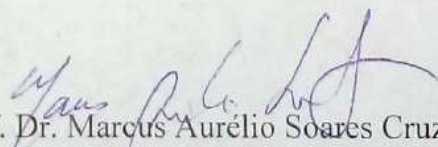


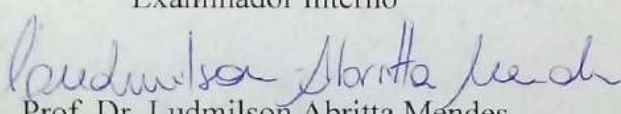
Ata da 57ª Sessão de Defesa Pública de Dissertação de
Mestrado em Recursos Hídricos.

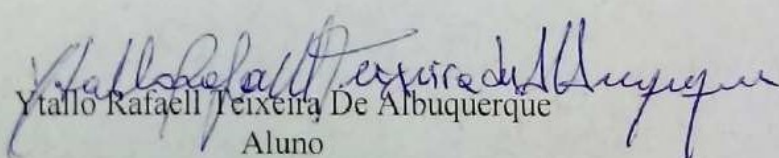
Ao vigésimo sexto dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e dezenove, às nove horas, realizou-se no Laboratório de Geoprocessamento, na Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, a sessão pública de defesa de dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos de **Ytallo Rafaell Teixeira De Albuquerque**, sob o título: Regionalização De Vazões Mínimas, Médias E Máximas Na Bacia Hidrográfica Do Rio Itapicuru - Ba, presidido pelo Prof. Dr. André Quintão de Almeida. O orientador passou a palavra ao aluno para que procedesse à apresentação de seu trabalho. Após a apresentação, o primeiro examinador externo, Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes, arguiu o aluno que teve igual período para sua defesa. O mesmo tempo foi franqueado ao examinador interno Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz, para a arguição do aluno, que, após as considerações, respondeu aos questionamentos. Em seguida, o Prof. Dr. André Quintão de Almeida, orientador do aluno, teceu comentários sobre o trabalho apresentado. Encerrada a apresentação, a banca examinadora solicitou que todos se retirassem do recinto para avaliação. A comissão decidiu **APROVAR** o aluno, sendo atendidas as determinações da banca examinadora e da Resolução nº 25/2014/CONEPE que regulamentam a apresentação e defesa de dissertação de Mestrado. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata que será assinada pelos componentes da banca e pelo aluno.

Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, 26 Fevereiro de 2019.


Prof. Dr. André Quintão de Almeida
Presidente-orientador


Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz
Examinador Interno


Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes
Examinador Externo


Ytallo Rafaell Teixeira De Albuquerque
Aluno

A todos aqueles que contribuíram para meu
crescimento profissional e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse.

À minha família, pelo incentivo e apoio incondicional.

E à Universidade Federal de Sergipe, pela oportunidade, ao professor André Quintão, pela orientação, apoio e confiança, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo auxílio financeiro.

“Toma conselhos com o vinho, mas toma decisões com a água.”

Benjamin Franklin

RESUMO

A pouca informação fluviométrica relacionada à inconsistência espaço-temporal de dados históricos disponíveis, tem resultado em grande restrição para se representar a dinâmica dos recursos hídricos em estudos hidrológicos, principalmente das vazões. Uma alternativa muito utilizada em pesquisas de bacias hidrográficas, consiste na aplicação de regionalização de vazões que determina a sua disponibilidade hídrica, por meio dos dados de vazões. Essa técnica permite transferir informação entre bacias hidrográficas semelhantes, ajustadas por meio de agrupamento de regiões homogêneas, com a finalidade de calcular, em localidades que não dispõem de dados, as variáveis fluviométricas de interesse, formando, assim, modelos de regressão entre os dados de vazão, constituindo-se como peça fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, setores elétrico, agrícola e para a adoção de políticas públicas. Neste sentido, o presente trabalho teve como principal objetivo regionalizar as vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos, médias de longa duração e mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos na Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru, localizada ao nordeste do Estado da Bahia, utilizando, para tanto, informações hidrológicas físico-climáticas e de relevo. Por meio da metodologia de agrupamento *clustering* híbrido *k-means* hierárquico, determinaram-se neste trabalho três regiões homogêneas da bacia hidrográfica com base nas variáveis explicativas: precipitação, evapotranspiração, relação precipitação-evapotranspiração, área e índice de vegetação de diferença normalizada – NDVI. Foram utilizados os métodos de regressão linear e correlação através do software R, que determinaram os modelos matemáticos de regionalização de vazões, de modo que os resultados foram obtidos para a região total da bacia hidrográfica e para a região homogênea I, não procedendo aos resultados das regiões homogêneas II e III por insuficiência de dados fluviométricos. A análise dos resultados obtidos considerou o menor valor de Bayesian Information Criterion, a menor soma do quadrado residual e os melhores valores de coeficiente de determinação para cada modelo ajustado. Todas as variáveis apresentaram interação em pelo menos um modelo ajustado, com exceção da variável explicativa NDVI que se mostrou menos expressiva no desenvolvimento dos modelos de regionalização de vazões propostos, não demonstrando impacto relevante em relação ao desempenho das demais variáveis. Em todas as análises de regressões feitas observaram-se resultados satisfatórios, vistos os coeficientes estatísticos obtidos, que indicam a significativa relação entre os valores das variáveis explicativas realizadas com o auxílio do método de ajuste de modelo aplicado, evidenciados pelos

coeficientes de correlação igual ou superior a 0,85 ou 85%, provando que as técnicas de sensoriamento remoto associadas à análises de regressão resultam em boas estimativas. O produto deste trabalho é uma ferramenta útil na execução de serviços como a concessão de outorga de direito de uso de água e deve-se lembrar que caso ocorra a necessidade de se conhecer o valor da vazão nos locais onde já existam estações fluviométricas utilizadas na determinação das regiões homogêneas I, II e III, os valores destas serão mais precisos do que a própria equação regional. Desta forma deve-se optar, não pelo cálculo, e sim pelo seu valor real. Por fim, os métodos utilizados apresentaram-se satisfatórios e, portanto, aplicáveis.

Palavras-chave: Análise Multivariada; Análise de Regressão; Outorga; Cluster; Hierárquico.

ABSTRACT

The little fluviometric information related to the spatiotemporal inconsistency of available historical data has resulted in great restriction to represent the dynamics of water resources in hydrological studies, especially the flow rates. An alternative widely used in river basin surveys is the application of flow regionalization that determines their water availability through flow data. This technique allows the transfer of information between similar river basins, adjusted by grouping homogeneous regions, in order to calculate, in locations without data, the fluviometric variables of interest, thus forming regression models between flow, constituting as a fundamental piece for the planning and management of water resources, the electric and agricultural sectors and for the adoption of public policies. In this sense, the present work had as main objective to regionalize the maximum flow rates associated with 10-year return periods, long-term and minimum 7-day averages and 10-year return period in the Itapicuru River Basin, located at northeast of the State of Bahia, using, for that, hydrological, climatic and relief information. Using the hierarchical k-means hybrid clustering methodology, three homogeneous watershed regions were determined based on the explanatory variables: precipitation, evapotranspiration, precipitation-evapotranspiration ratio, area and normalized difference vegetation index - NDVI. Linear regression and correlation methods were used using the R software, which determined the mathematical models of flow regionalization, so that the results were obtained for the total watershed region and for the homogeneous region I, not proceeding to the results of the homogeneous regions II and III due to insufficient fluviometric data. The analysis of the obtained results considered the lowest Bayesian Information Criterion value, the smallest sum of the residual square and the best coefficient of determination for each adjusted model. All variables presented interaction in at least one adjusted model, with the exception of the NDVI explanatory variable, which was less expressive in the development of the proposed flow regionalization models, showing no relevant impact in relation to the performance of the other variables. In all regression analyzes, satisfactory results were observed, considering the statistical coefficients obtained, which indicate the significant relationship between the values of the explanatory variables performed with the aid of the applied model adjustment method, evidenced by the correlation coefficients equal or higher. at 0.85 or 85%, proving that remote sensing techniques associated with regression analysis yield good estimates. The product of this work is a useful tool in the execution of services such as the granting of the right to use water and it should be remembered that if there is a need to know

the value of the flow in places where there are already fluviometric stations used in the determination. of homogeneous regions I, II and III, their values will be more accurate than the regional equation itself. Thus, one should choose, not for the calculation, but for its real value. Finally, the methods used were satisfactory and therefore applicable.

Keywords: Multivariate Analysis; Regression Analysis; Granting; Cluster; Hierarchical.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização físico-climática da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru.....	26
Tabela 2. Caracterização físico-climática da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru por regiões Homogênea.....	30
Tabela 3. Informações das estações fluviométricas adotadas para este estudo.....	37
Tabela 4. Valores da $Q_{\text{máx}}$ das estações fluviométricas e distribuição adotada.....	39
Tabela 5. Valores da Q_{med} das estações fluviométricas e distribuição adotada.	40
Tabela 6. Valores da $Q_{\text{mín}}$ das estações fluviométricas e distribuição adotada.....	40
Tabela 7. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{máx}}$ para todas as regiões.....	47
Tabela 8. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{máx}}$ para a região I.....	49
Tabela 9. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{méd}}$ para todas as regiões.....	51
Tabela 10. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{méd}}$ para a região I.....	52
Tabela 11. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{mín}}$ para todas as regiões.....	53
Tabela 12. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{mín}}$ para a região I.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da Bacia do Rio Itapicuru.....	21
Figura 2. Distribuição espacial dos pontos de grade de dados climáticos, metodologia de Xavier et al. (2015), inseridas na BHRI.....	22
Figura 3. Modelo Digital de Elevação da BHRI derivado do SRTM.....	25
Figura 4. Dendrograma obtido pelo método hkmeans.....	28
Figura 5. Regiões Homogêneas de clima na BHRI.....	29
Figura 6. Mapa da Bacia do Rio Itapicuru.....	35
Figura 7. Distribuição espacial dos 10 postos fluviométricos na BHRI (1-Pindobaçu, 2-Ponto Novo, 3-Jacobina, 4-Pedras Altas, 5-Queimadas, 6-Ambrósio, 7-Ponte Euclides da Cunha, 8-Cipó, 9-Fazenda Trianon, 10-Usina Altamira).....	37
Figura 8. Área da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru e as dez Sub-bacias que a envolve.....	42
Figura 9. Regiões homogêneas e as suas respectivas estações fluviométricas para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	ARTIGO I: Definição de regiões hidrologicamente homogêneas a partir de técnicas de estatística multivariada na Bacia Hidrográfica do rio Itapicuru-BA com base em dados físico-climáticos e de sensoriamento remoto	18
2.1	INTRODUÇÃO	18
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	20
2.2.1	Área de estudo	20
2.2.2	Base de dados climáticos.....	21
2.2.3	Características de solos	22
2.2.4	Dados de relevo	22
2.2.5	Dados de sensoriamento remoto (SR)	23
2.2.6	Análise de agrupamento	24
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.4	CONCLUSÕES	31
3	ARTIGO II: Regionalização das Vazões Mínimas, Médias e Máximas na Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru-BA	32
3.1	INTRODUÇÃO	32
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.2.1	Área de estudo	34
3.2.2	Base de dados climáticos e de relevo	35
3.2.3	Dados de sensoriamento remoto (SR).....	35
3.2.4	Dados fluviométricos	36
3.2.5	Estimativa das Vazões	38
3.2.6	Definição das regiões homogêneas	40
3.2.7	Variáveis Explicativas ou Independentes.....	41
3.2.8	Estações fluviométricas.....	42
3.2.9	Ajuste dos modelos	42
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.3.1	Regiões Hidrologicamente Homogêneas	44
3.3.2	Estacionariedade.....	45
3.3.3	Modelos de regionalização de vazões	47
3.3.3.1	Modelo de Regionalização de Vazões Máximas.....	47

3.3.3.2	Modelo de Regionalização de Vazões Médias.....	50
3.3.3.3	Modelo de Regionalização de Vazões Mínimas	53
3.3.3.4	Modelo de Regionalização de Vazões para as Regiões Homogêneas II e III	55
3.4	CONCLUSÕES	57
4	CONCLUSÃO GERAL	59
5	AGRADECIMENTOS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil possui aproximadamente 12% da reserva de água doce do planeta, portanto, o planejamento, utilização e gestão de suas águas deve ser assunto estratégico para país. A gestão da água doce, dentre outros tipos existentes no Brasil, está regulamentada na Lei n° 9433/97, (Brasil, 1997), que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e estabelece o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH). Os princípios fundamentais dessa Lei são os princípios da participação e descentralização na tomada de decisão, incorporando o princípio constitucional de que a água é um bem público, elegendo os planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas como um dos principais instrumentos de implementação da PNRH. Um dos principais instrumentos da PNRH, a outorga dos direitos de uso da água (Lei n.º 9433, art. 11, Brasil, 1997), tem por finalidade garantir a disponibilidade hídrica de uma determinada região, enquadrando o uso da água dentro dos padrões sustentáveis de qualidade e quantidade, assegurando assim, a água para futuras gerações.

Neste contexto, se faz necessário ter conhecimento sobre as vazões máximas e as mínimas, estas que servem de referência para a outorga dos direitos de uso da água, utilizada como objeto de auxílio por órgãos gestores nas tomadas de decisão (Rego, 2013; Pessoa, 2015). Normalmente, a estimativa de vazões de outorga em cursos d'água são realizadas a partir de séries temporais adquiridas de estações fluviométricas, localizadas em toda a região de abrangência da bacia hidrográfica. No entanto, em países com dimensões continentais como o Brasil, a rede de monitoramento hidrológico nem sempre é tão densa. Em algumas regiões do País, como as regiões Nordeste e Norte, o número de estações fluviométricas e pluviométricas é insuficiente para monitorar e caracterizar as principais bacias localizadas nessa região. Por sua vez, uma região com alta densidade de estações fluviométricas não garante a sua total cobertura hidrográfica, de forma a existir irregularidades temporais e espaciais (Sousa, 2009; Tucci, 2009; Rego, 2013; Pessoa, 2015; Silva, 2018).

Para solucionar esses problemas, diversas técnicas são utilizadas com a finalidade de realizar uma melhor estimativa dos dados de interesse em seções do corpo hídrico nas quais não haja medições hidrológicas. Assim, uma das técnicas mais difundidas para resolução dessa questão é a regionalização de vazões, podendo ser dividida em dois métodos principais: (i) metodologias que envolvem a implantação e operação de redes hidrométricas e caracterização geomorfológica das áreas hidrográficas, para posteriormente transferir as informações hidrológicas obtidas de uma região com dados para uma outra com ausência de dados, com base

que as regiões são homogêneas quanto às suas características similares (Nerc, 1975; Eletrobrás, 1985; Euclydes et al. 2001; Naghettini; Pinto, 2007; Pessoa, 2015); e (ii), as que envolvem métodos de interpolação e extrapolação automática com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Chaves et al. 2002). Os modelos de regionalização de vazões são opções interessantes para a solução de problema em áreas com restrição de rede hidrométrica diante da sua vasta extensão territorial, como é o caso da região Nordeste e outras regiões do Brasil. Essa técnica pode ser aplicada a indicadores hidrológicos em geral, como, também, parâmetros de modelo chuva-vazão e funções hidrológicas, atuando na minimização da possibilidade de conflitos, através da previsão da disponibilidade hídrica (Pessoa, 2015). Assim, diversos trabalhos de regionalização de vazões têm sido realizados, como o de Andrade et al. (2004), aplicado no Estado do Ceará, Lopes et al. (2016), aplicado no Paraná, Barbosa et al. (2005), desenvolvido no Estado de Minas Gerais, Mendes e Schneider (2015), aplicado no Estado de Sergipe, dentre diversos outros.

De acordo com Rego (2013), o aperfeiçoamento dos métodos para identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e a busca de variáveis explicativas são procedimentos que devem ser metas para uma melhor representatividade de estudos de regionalização de vazões. As regiões chamadas homogêneas são associadas às mesmas particularidades hidrológicas, sejam elas fatores físicos, climáticos, biológicos, geológicos e efeitos antrópicos (Pessoa, 2015). A determinação dessas regiões é uma etapa da regionalização de vazões que possui certo grau de subjetividade (Valverde, 2001), onde o interesse é verificar como as amostras se relacionam a partir das suas semelhanças. Uma das formas mais utilizadas pelos autores, na obtenção de resultados quanto à divisão de regiões semelhantes é por meio de análise de agrupamento (*cluster analysis*), cuja função é agregar objetos com base nas características similares que os mesmos possuem (Pessoa, 2015). Para a realização dessa etapa, existem os seguintes métodos de análise de agrupamento: aglomerativo hierárquico de Ward, difuso *Fuzzy C-Means*, *K-means clustering*, entre outros. Diversos trabalhos já empregaram as técnicas de agrupamento para selecionar regiões com homogeneidade hidrológica, como: Booker; Snelder (2012); Santos (2014); Tongal et al. (2013); Parracho et al. (2015); Goyal e Gupta, (2014), entre outros.

Após a etapa inicial, uma outra fase no processo de regionalização de vazões é a formulação de modelos a partir da utilização da técnica de regressão simples ou múltipla, que determina a magnitude das vazões para um determinado período de retorno (Malekinezhad et al., 2011). Existem diversos modelos de regressão, sendo os principais: linear, exponencial, potencial, logarítmico e recíproco. Segundo o Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos

(GPRH) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (2012), o modelo de regressão mais utilizado para relacionar a vazão com as características da bacia é o modelo potencial, visto seu desempenho como o melhor modelo de regressão para todas as bacias regionalizadas no estado de Minas Gerais.

Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho foi ajustar equações de regionalização de vazões para Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru – BHRI, localizada no Estado da Bahia, que atualmente possui insuficiência de dados de vazões para toda sua área. Para tal, os objetivos específicos foram divididos em dois: (i), definição de regiões hidrologicamente homogêneas a partir de técnicas de estatística multivariada na bacia hidrográfica do rio Itapicuru - BA com base em dados físico-climáticos e de sensoriamento remoto; e (ii), ajuste de modelos regionais de estimativa de vazões máximas, médias e mínimas a partir de técnicas de regressão múltipla na bacia hidrográfica do rio Itapicuru-BA.

2 ARTIGO I: Definição de regiões hidrologicamente homogêneas a partir de técnicas de estatística multivariada na Bacia Hidrográfica do rio Itapicuru-BA com base em dados físico-climáticos e de sensoriamento remoto

2.1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de vazão em uma bacia é um fator determinante para quantificar, entre outros, a disponibilidade hídrica ou dos excedentes de vazões, onde o seu conhecimento é indispensável e fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (Brasil, 1997; Pessoa, 2015). No entanto, um dos problemas que se apresentam em estudos relacionados às vazões, é a falta de monitoramento fluviométrico, que acarreta na falta de informação ao longo do tempo nas bacias hidrográficas. As regiões Norte e Nordeste do Brasil, por exemplo, apresentam uma rede pouco densa de estações hidrológicas, o que compromete os estudos de planejamento e gestão dos cursos d'água dessas regiões

Desse modo, para tentar preencher a ausência de dados, o desenvolvimento de modelos de simulação de vazões, em bacias sem monitoramento, tem se tornado muito comum. Dentre as mais diversas técnicas, têm se destacado os estudos de regionalização de vazões, utilizados principalmente em estudos de outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos. Este método consiste na utilização de um conjunto de ferramentas que busca realizar a transferência de informações de uma região que apresenta dados para outra região que não possui dados, com o intuito de suprir esta carência de informação, em uma dada região considerada homogênea (Nerc, 1975; Eletrobrás, 1985; Euclides et al. 2001; Chaves et al. 2002; Silva, 2018).

Considerada uma das etapas iniciais no desenvolvimento da regionalização, a identificação de regiões homogêneas pode ser realizada por diversas formas, por exemplo, através de funções de probabilidade, análise de agrupamento, entre outros. A identificação de regiões homogêneas, quanto às suas características físicas e climáticas, pode ser realizada de acordo com duas finalidades: a primeira, descritiva, cujo objetivo é a caracterização hidrológica, e a segunda, como subsídio essencial na regionalização (Gomes et al., 2018). Assim, diversos trabalhos de identificação de regiões homogêneas têm sido realizados, no mundo inteiro, objetivando a aplicação da regionalização, como nos trabalhos de Srinivas et al. (2008) e Rao e Srinivas (2006) que obtiveram as regiões homogêneas de vazões de Indiana, Estados Unidos, através de dados anuais máximos de fluxo das bacias hidrográficas.

Um das técnicas comumente utilizadas na hidrologia para se definir regiões hidrologicamente homogêneas é a análise estatística multivariada de agrupamento, também

conhecida como análise de cluster (Pessoa, 2015; Silva, 2018). Nesta técnica, as regiões homogêneas são definidas com base na similaridade de suas características hidrológicas, como, os aspectos (i) físicos: relevo, altitude, área de drenagem, tipo de vegetação, entre outros; e (ii), hidrológicos, como as precipitações e o comportamento das vazões (Silva, 2018). Segundo Moraes (2016), os métodos de agrupamento podem ser divididos em hierárquicos, que constroem uma hierarquia semelhante a uma árvore, feita em partições, onde há relacionamentos entre os elementos; e não-hierárquicos ou particionais, que constroem uma partição dos dados, dividindo os objetos em grupos, sem sobreposição, tomando por base as características que estes objetos possuem. De modo geral, a análise de agrupamento trabalha na separação de elementos com características distintas (heterogeneidade externa) e na união de grupos com elementos que possuem características comuns (homogeneidade interna). Essa análise faz a organização dos dados que servirão para auxiliar o processo de construção da superfície de decisão e determinará qual a região de influência de cada grupo de dados, tornando-se, uma ferramenta muito útil para a análise de dados em diversas situações (Linden, 2009).

Apesar do elevado número de estudos de definição de áreas homogêneas para fins de regionalização de vazões, poucos ainda são aqueles que utilizam de dados de sensoriamento remoto (SR), como os dados do Índice da Diferença Normalizada da Vegetação (NDVI), que permite observar o comportamento da vegetação na superfície terrestre ao longo do tempo (EMBRAPA, 2016). Assim, o objetivo deste trabalho foi identificar regiões hidrologicamente homogêneas na bacia hidrográfica do rio Itapicuru–BA através de análise estatística multivariada de agrupamento, a partir de características físico-climáticas e dados de sensoriamento remoto.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo

A bacia do rio Itapicuru (BHRI) está localizada na região nordeste da Bahia (Figura 1) e possui uma área 38.664 km², representando 6,60% do Estado. Sua população ultrapassa 1,4 milhão de habitantes, representando 10,05% do total do Estado, possuindo uma economia voltada à atividade mineradora e predomínio da agricultura de subsistência e pecuária tradicional (IBGE, 2011; INEMA, 2018). A BHRI limita-se ao norte com as bacias do rio Real e rio Vaza Barris, a oeste com a bacia do São Francisco, e ao sul com as bacias do rio Paraguaçu e rio Inhambupe (CRA, 2001).

O rio Itapicuru, o principal curso de água, deu o nome à bacia, o mesmo nasce a oeste, no município de Campo Formoso, no piemonte da chapada Diamantina, a 766,0 m de altitude, percorrendo 534,8 km até desaguar no oceano Atlântico, no município do Conde. Seus principais afluentes são os rios Itapicuru-açu, com nascente no município de Pindobaçu, Itapicuru-mirim com nascente no município de Miguel Calmon, e rio do Peixe em Capim Grosso, todos estes na margem direita do Itapicuru, ao todo 55 municípios integram parcial ou integralmente a BHRI (Virões, 2013; INEMA, 2018).

A bacia apresenta um clima semi-árido em 81% da área, com chuvas anuais inferiores a 700 mm. Na parte superior da região, na Chapada da Diamantina, o clima torna-se mais ameno, mudando para o tipo subúmido a seco, com os totais pluviométricos atingindo até 900 mm. No trecho inferior da bacia do Rio Itapicuru o clima muda para o tipo úmido a subúmido com precipitações variando de 1000 até 1400 mm. Seu relevo é, predominantemente, mais suave, possuindo os seguintes ambientes hidrológicos: 18,8% da área em relevo plano; 43,2% em relevo suave ondulado; ondulado abrange 27,7%; ondulado 8,1%; e apenas 2,2% da área apresentam relevo entre montanhoso e forte montanhoso (Virões, 2013).

Quanto à cobertura vegetal, em sua parte superior, no Pediplano da Chapada da Diamantina, encontram-se os remanescentes de florestas estacionais e campos rupestres; em sua parte central, abrange as depressões periféricas e interplanálticas, e a bacia sedimentar de Tucano, onde há a predominância de pastagens entremeadas por áreas com vegetação de Caatinga; o seu trecho final encontra-se sobre o Planalto Costeiro onde ocorrem espécies florestais secundárias da Mata Atlântica (INEMA, 2018).

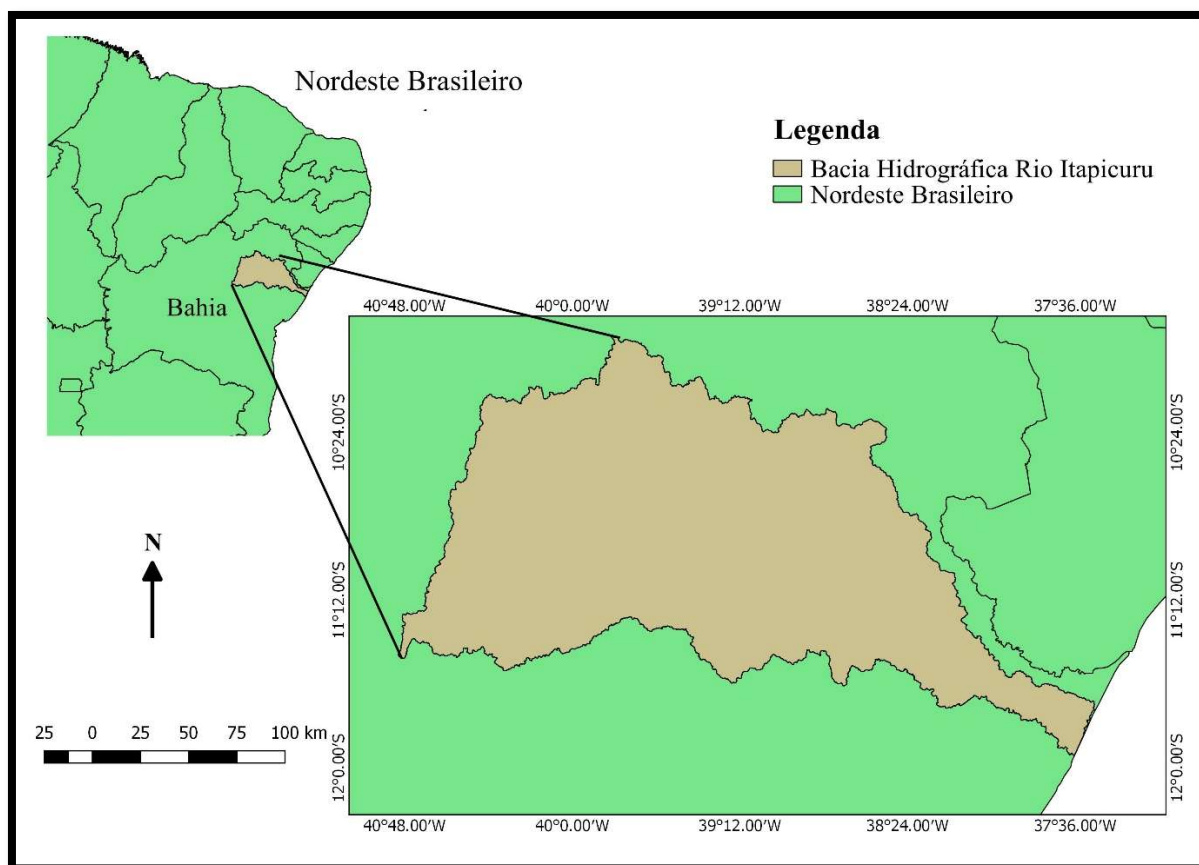


Figura 1. Mapa de localização da Bacia do Rio Itapicuru. Fonte: Autor (2019)

2.2.2 Base de dados climáticos

Os dados climáticos foram obtidos a partir do estudo realizado por Xavier et al. (2015), utilizando os dados históricos (1980 a 2013) diários de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração potencial (ET0) de 82 pontos de grade inseridos no contexto da bacia, todos em milímetros (Figura 2). A partir destes, a relação entre P e ET0 também foi estimada. No estudo, os autores utilizaram um conjunto de dados meteorológicos pontuais coletados em estações convencionais e automáticas distribuídas em todo território nacional durante o período de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2013. A partir dos dados pontuais de clima e técnicas de interpolação espacial, uma grade densa de pontos ($0,25 \times 0,25^\circ$) foi gerada para todo o continente brasileiro, contendo valores diários de temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, evapotranspiração, velocidade do vento e radiação solar. A evapotranspiração foi estimada com base na equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

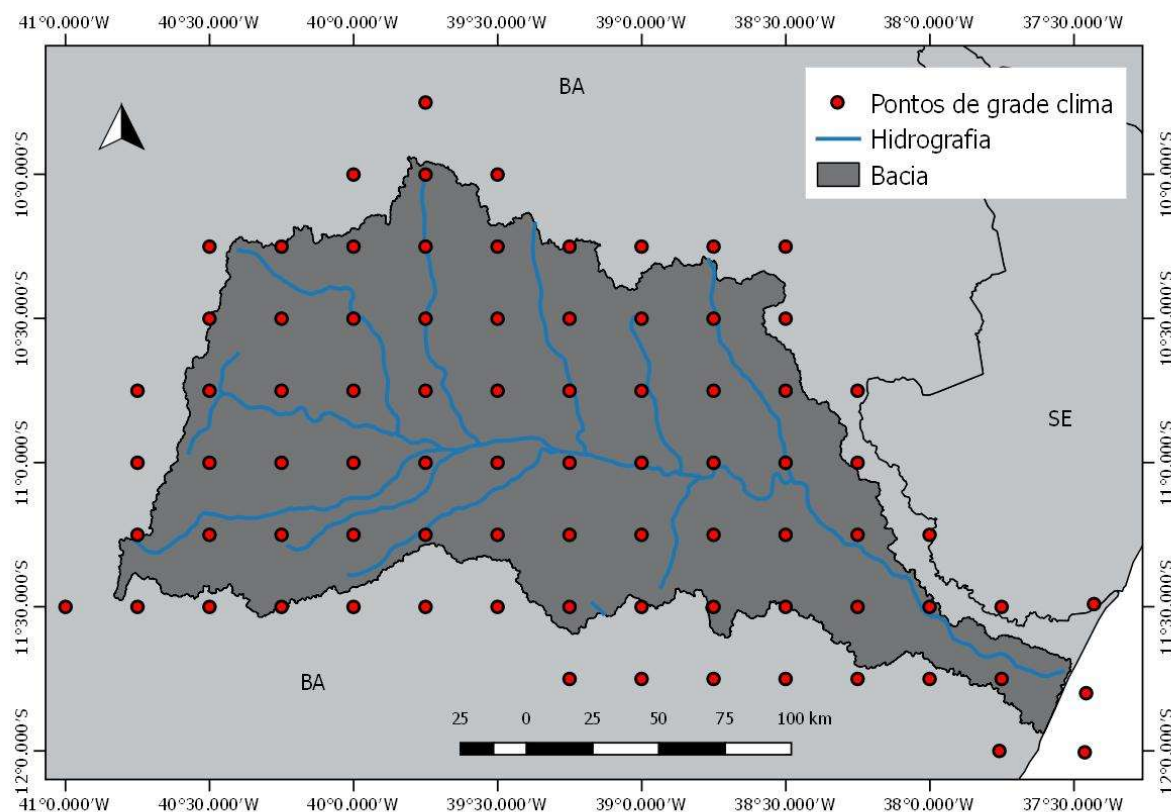


Figura 2. Distribuição espacial dos pontos de grade de dados climáticos, metodologia de Xavier et al. (2015), inseridas na BHRI. Fonte: Autor (2019)

2.2.3 Características de solos

O solo constitui-se de um fator fundamental para o processo de infiltração, essencial para a recarga de aquíferos. Características como estrutura e textura do solo influenciam diretamente na condutividade hidráulica (Moraes, 2012).

As classes de solo que predominam na região da Bacia hidrográfica do Rio Itapicurú, são as classes dos Planossolos, Latossolos e Argissolos, com ocorrência de Neossolos, Cambissolos, dentre outras classes (Purificação et al., 2016).

2.2.4 Dados de relevo

Os dados de altitude para cada ponto de grade climática foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Com resolução espacial de 90 m e escala equivalente a 1:250.000 (Sreedevi et al., 2009), estes dados estão disponíveis no site da Agência Espacial Americana (NASA).

Para a composição de toda a área de estudo, foram baixados 13 cenas SRTMs, do Estado da Bahia, compatíveis com as folhas na escala 1:250.000 do IBGE, sendo: SC-24-V-C, SC-24-V-D, SC-24-X-C, SC-24-Y-A, SC-24-Y-B, SC-24-Z-A, SC-24-Y-C, SC-24-Y-D, SC-24-Z-C, SE-24-Z-D, SD-24-V-A, SD-24-V-B, SD-24-X-A (EMBRAPA, 2018).

O *software* utilizado para manipulação das imagens SRTM foi o Quantum GIS (QGIS) 2.18.14 Las Palmas (QGIS Development Team, 2019).

2.2.5 Dados de sensoriamento remoto (SR)

O Índice da Vegetação (IV) derivado de um sensor remoto orbital utilizado neste estudo foi o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). A abreviação da expressão em inglês para Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1973) equivale em português a Índice de Vegetação da Diferença Normalizada. Este índice realça o componente espectral da vegetação por meio da combinação das bandas espectrais do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP) (Equação 01). Sendo mais sensíveis às variações da estrutura do dossel do que as bandas individuais do sensor, podendo variar de -1, áreas sem vegetação e +1, áreas com vegetação.

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1)$$

em que,

V: banda espectral do vermelho; e

IVP: banda espectral do infravermelho próximo.

Este índice está disponível em uma ferramenta gratuita desenvolvida pela Embrapa Informática Agropecuária, chamada Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg). Este sistema se destina à observação e análise dos seus perfis temporais de NDVI, permitindo ao usuário observar o comportamento da vegetação na superfície terrestre ao longo do tempo (EMBRAPA, 2016). As séries de dados NDVI foram baixadas da plataforma da EMBRAPA para cada um dos 82 pontos de grade climático inserido na bacia. As imagens obtidas são provenientes do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua. Nestes, os NDVIs são disponibilizados em composições máximas de 16 dias, com resolução espacial de aproximadamente 250 m.

A compatibilização dos dados de clima e NDVI foi procedida através do cruzamento das escalas espaciais, capturando-se os valores de NDVI da célula em que se encontrava os pontos da grade climática, resultando em valores de clima e vegetação para um mesmo ponto da grade. Quanto à escala temporal, os dados climáticos compreenderam as médias mensais da série histórica de 1980 a 2013 e os dados de NDVI, as médias mensais dos dois valores a cada 16 dias da série histórica de 2000 a 2017.

2.2.6 Análise de agrupamento

Foram considerados na análise de agrupamento os dados físico-climáticos da bacia para cada ponto de grade contendo altitude, precipitação pluvial, evapotranspiração potencial e a relação entre a chuva e a evapotranspiração. Além destas informações, também foram utilizados os valores de NDVI compatibilizados em escala espaço-temporal para cada ponto de grade. Para a determinação das regiões hidrologicamente homogêneas, foi utilizada a combinação dos métodos de análise de agrupamento *clustering* hierárquico e *k-means*, uma aplicação fornecida usando ferramentas através do software R (R CORES TEAM, 2015). Esse processo é denominado *clustering* híbrido *k-means* hierárquico ou *hkmeans* (Galili, 2016).

O procedimento realizado foi dividido em: (i), computou-se o agrupamento hierárquico e aplicou-se o corte na árvore em *k-clusters*; (ii), calculou-se o centro de cada cluster; e (iii), calculou-se *k-means* usando o conjunto de centros de cluster como os centros de cluster iniciais. Este método baseou-se no critério maior distância para fazer a segregação dos grupos, compostos por 82 pontos da grade de dados climáticos inseridos na bacia.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Caracterização físico-climática da bacia

O mapa de relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru-BA pode ser visualizado na Figura 3.

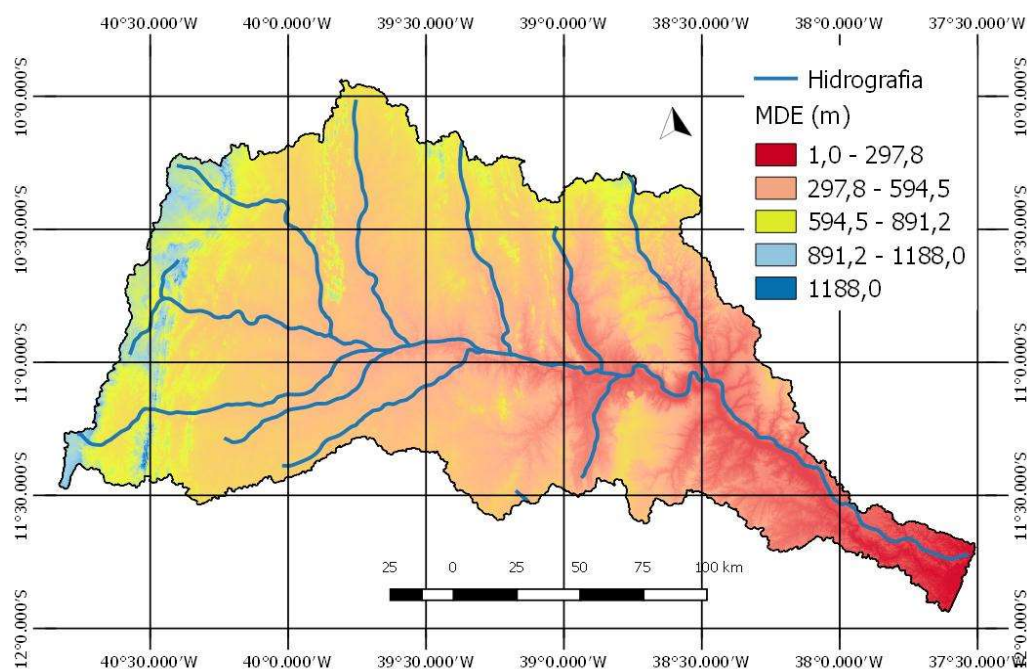


Figura 3. Modelo Digital de Elevação da BHRI derivado do SRTM. Fonte: Autor (2019)

Nota-se que o relevo da bacia é bastante acidentado, com valores de altitude próximos de zero na foz e valores acima de 1000 metros na região de cabeceira. O relevo da bacia é uma das principais características físicas que interferem no comportamento hidrológico dos seus cursos d'água. Esta bacia caracteriza-se com relevo acidentado, apresentando uma elevada capacidade de acelerar o escoamento superficial nos canais de drenagem. Cabe ressaltar que esta não é a única característica física da bacia que interfere nesses processos, podendo destacar o uso e cobertura da terra e suas características morfológicas, como área de drenagem, fator de forma, dentre outras. A variação dos valores de altitude dentro da bacia, também pode influenciar na definição das regiões hidrológicamente homogêneas. Para Purificação et al., (2016), esse resultado é devido, principalmente, ao fato do elemento fisiográfico chamado geomorfologia, que configura a dinâmica da água em superfície e contribui para a caracterização do relevo existente. Outro fator, que caracteriza os valores de altitude, são as formações do relevo, que situa a nascente em trechos formados por pediplano cimero da chapada Diamantina, por planaltos Karsticos e por serras maciças residuais, e a foz formada por mares de morro (Radambrasil, 1983; Purificação et al., 2016).

Corroborando aos resultados deste trabalho, Virões (2013) verifica a semelhança dos resultados através do traçado do perfil longitudinal da bacia hidrográfica que determina as mais altas altitudes em cerca de 800 m na sua porção ao oeste, região da nascente, e valores inferiores, próximos de zero, na região ao leste.

A Tabela 1 demonstra os valores das características físico-climáticas utilizadas neste trabalho, apresentando seus valores mínimos, médios e máximos coletados na região da BHRI.

Tabela 1. Caracterização físico-climática da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru. Autor (2019)

Valor	P (mm ano ⁻¹)	ET0 (mm ano ⁻¹)	P ET0 ⁻¹	ALT (m)	NDVI
Mínimo	521,80	1555,00	0,29	1,00	0,30
Médio	747,30	1651,00	0,45	405,70	0,50
Máximo	1523,00	1814,00	0,98	1188,00	0,68

P, precipitação; ET0, evapotranspiração potencial; ALT, a altitude; e NDVI, índice da diferença normalizada da vegetação.

A bacia apresenta uma variação de precipitação significativa, com diferença entre os extremos de aproximadamente 1000 mm. Os maiores valores de chuva ocorrem na região mais baixa da bacia e os menores na região mais elevada, clima semiárido. Isso se explica pelo fato de a bacia estar situada em três variações de zonas climáticas (zona tropical, a zona seca e a zona subtropical úmida) de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). Em conformidade com Purificação et al. (2016); Silva e Fontes (2017) corroboram que nas regiões próximas a serra de Jacobina, na porção sudoeste da bacia, a pluviosidade alcança até 1000 mm anuais, fazendo parte da zona tropical com verão seco (As); nas regiões próximas à costa, mais próxima à foz, encontram-se as zonas tropical sem estação seca (Af) e monção (Am), com pluviosidade podendo atingir valores de 1500 mm/ano; e na região de menor pluviosidade, na porção central desta bacia, a pluviosidade varia de 400 a 600 mm anuais, fazendo parte da zona seca do semiárido de baixa latitude e altitude (BSh).

A demanda evapotranspirativa da bacia é bastante elevada, com valores mínimos de evapotranspiração potencial (ET0) próximos de 1500 mm ano⁻¹ e máximos próximos de 1800 mm ano⁻¹. Para Pereira et al. (1997), a quantidade de água evapotranspirada depende principalmente do suprimento de água às plantas, do poder evaporante do ar e da disponibilidade de energia de cada região. Carvalho et al. (2013) e Brito (2007) observaram uma diferença significativa na evaporação média anual, de 1.847mm, definindo-a como relativamente alta, estando dentro da faixa típica de uma região semiárida.

A relação P/ET_0^{-1} corrobora a elevada demanda evapotranspirativa da bacia, com todos os valores abaixo da unidade, ou seja, os valores de ET_0 ao longo do ano são superiores ao precipitado, evidenciando a importância de estudos que busquem a segurança hídrica na bacia. No Estado do Ceará, Rocha et al. (2017) observaram uma maior correlação negativa no primeiro semestre, acima de 70% para janeiro, fevereiro e abril, quando comparado com o segundo, entre 39% e 56%, isso se deve ao fato que os meses com menores precipitações resultam em maiores valores de ET_0 , devido à variação dos valores de ET_0 da região.

Os valores de NDVI variaram entre 0,3 e 0,67, uma variação de quase 0,4. Cabe destacar que os valores de NDVI refletem o vigor da vegetação, sendo, portanto, uma variável importante na definição de regiões hidrologicamente homogêneas na bacia. Podendo ser uma variável importante em estudos de definição de regiões homogêneas com finalidade de geração de equações de regionalização de vazões. De acordo com Gameiro et al. (2016), avaliando a cobertura vegetal por meio NDVI na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe – CE, no período úmido (15/05/2015), observaram os valores de 0,5 NDVI, a mesma média do valor encontrado neste trabalho para a BHRI, isso explica-se devido à presença de uma vegetação com mais folhas na região, resultado da boa disponibilidade de água no solo, que proporcionou melhores condições no desenvolvimento da vegetação nativa e das áreas agricultáveis. Já Almeida et al. (2012) fazem a classificação da vegetação de Caatinga com baixo nível de alteração ambiental e degradação em arbóreo-arbustiva fechada (NDVI entre os níveis 0,43 a 0,81) e arbustivo-arbórea fechada (NDVI entre 0,25 a 0,32), sabendo-se que a grande região central da BHRI é caracterizada por predominar as pastagens entremeadas por áreas com vegetação de Caatinga (INEMA, 2018), podendo ser um dos fatores dos valores de NDVI encontrados na BHRI. Recomenda-se necessário o maior aprofundamento em estudos que desenvolvam e comprovem a qualidade desta variável neste tipo de estudo, haja vista as poucas fontes de informação que abordam sobre esta variável.

2.3.2. Regiões hidrologicamente homogêneas

A Figura 4 mostra o dendrograma obtido pelo método de agrupamento *Hierarchical k-means clustering (hkmeans)*, com a distância como medida de similaridade e apresentando os dados de clima dos anos de 1980 a 2013 e dados de NDVI dos anos de 2000 a 2017 como as variáveis de agrupamentos nos 82 pontos da grade meteorológicas na área de estudo. O eixo das ordenadas mostra a distância, em que, quanto maior seu valor, maior a heterogeneidade dos

dados das estações agrupadas. O número de grupos foi determinado de maneira subjetiva, selecionando e agrupando os pontos de grade com maior similaridade entre as características físico-climáticas e de vegetação em grupos, através de um corte transversal no dendrograma resultante do agrupamento. Considerando o nível de heterogeneidade, bem como a distribuição espacial dos pontos meteorológicos, foi adotada a distância de 7 para a definição do número de grupos, gerando-se três regiões homogêneas. Vale ressaltar que todas as variáveis tiveram mesmo peso quanto a definição do agrupamento.

Um fato importante que pode estar relacionado a esse resultado, encontra-se no fato de o desempenho do agrupamento hierárquico ser melhorado pelo algoritmo *k-means*, em comparações feita por Galili (2016), entre *clustering* hierárquico e abordagem híbrida. Dessa forma, procede-se ao uso de método híbrido, com a finalidade de minimizar o esforço necessário para identificar regiões homogêneas, fornecendo flexibilidade suficiente e oferece perspectivas de melhoria nos estudos de regionalização (Rao; Srinivas, 2006).

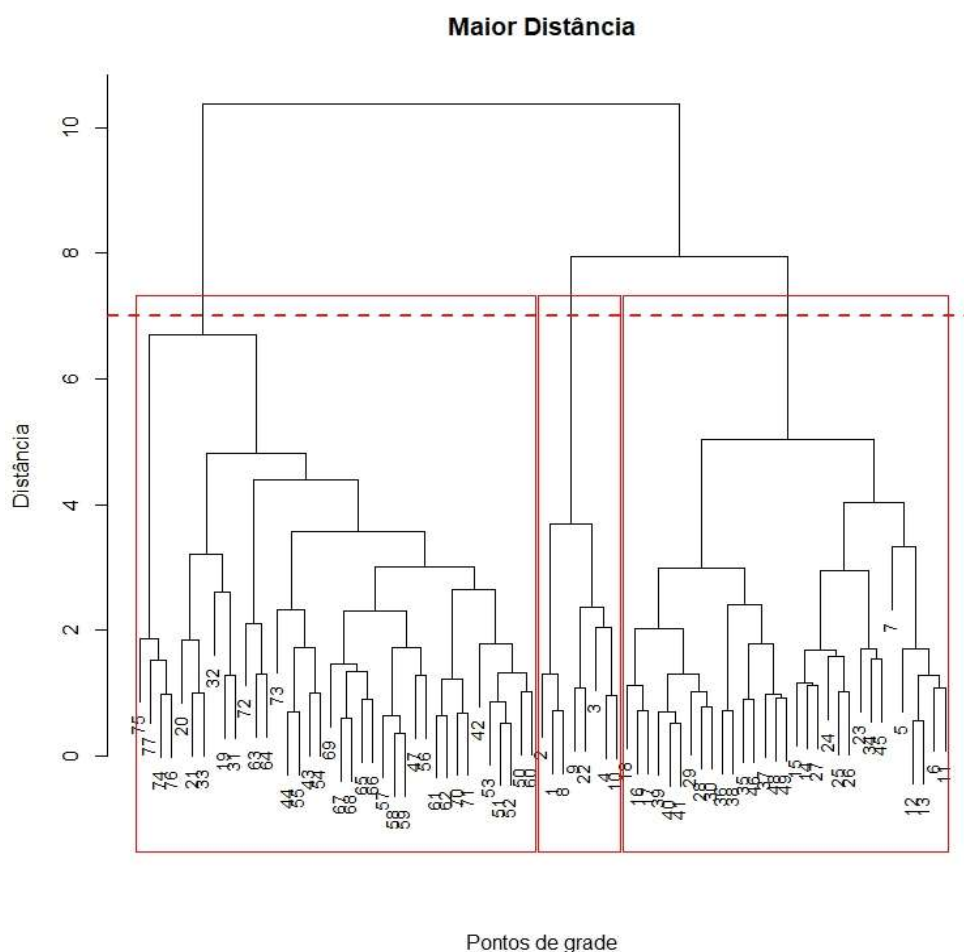


Figura 4. Dendrograma obtido pelo método *hkmeans*. Fonte: Autor (2019)

A Figura 5 mostra o refinamento da análise e a disposição espacial dos três grupos definidos após a aplicação do método *hkmeans*, com a hidrografia percorrendo todas as regiões determinadas. Observa-se que a Região I abrangeu a área de maior altitude e parte central do mapa da bacia hidrográfica do rio Itapicuru, onde essas áreas apresentam semelhança no relevo, vegetação e na precipitação média anual. A região II abrange um relevo mais estável, caracterizado entre plano e suave ondulado, e apresenta os valores mínimos de precipitação média anual comparado com as demais regiões. Já a região III abrange um relevo misturado e apresenta maior valor de precipitação média anual, envolvendo, também, a região da foz do rio principal, que sofre a influência dos efeitos de região litorânea.

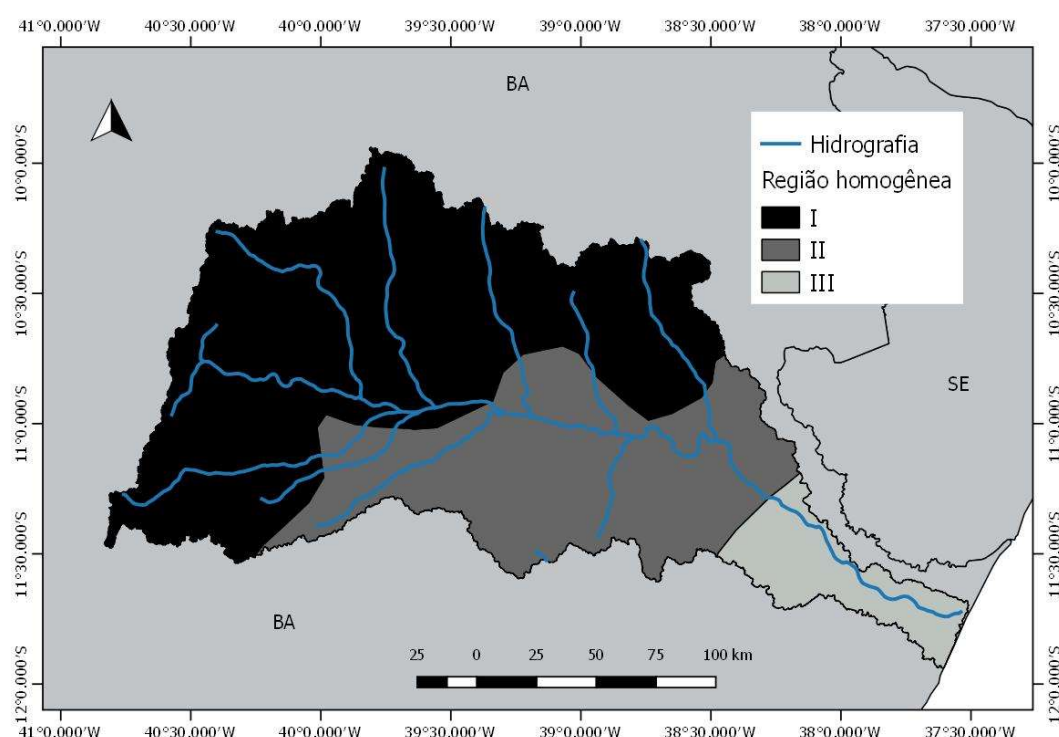


Figura 5. Regiões Homogêneas de clima na BHRI. Fonte: Autor (2019)

Corroborando ao resultado apresentado, o corolário de Virões (2013) apresentou-se semelhante ao que se obteve neste trabalho. A área que compreende a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru também foi dividida em três regiões, à foz, ao centro e à nascente, concernindo ambos os resultados.

Por outro lado, Chaves et al. (2002) diferem desses resultados, uma vez que a região da mesma bacia hidrográfica foi dividida em apenas duas regiões homogêneas. Este fato se deve em função do pequeno número de postos fluviométricos utilizados no estudo, apenas quatro, e, além disso, ter usado apenas uma variável explicativa, a área. Ambas as limitações devem ter contribuído para a menor precisão adquirida.

A Tabela 2 apresenta a precipitação e a evapotranspiração média anual, respectivamente, de cada região, para o período estudado, além das outras características físico-climáticas analisada no estudo. Fica evidente que, apesar de o comportamento médio das duas primeiras regiões seguirem uma mesma tendência mais próxima, ao longo dos anos, a precipitação média anual da região II é sempre superior à da região I. No entanto, em média, a precipitação anual da região III é mais que o dobro em relação aos demais grupos.

Tabela 2. Caracterização físico-climática da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru por regiões Homogênea. Fonte: Autor (2019)

Variável	Grupo (Cluster)								
	I			II			III		
	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.
Chuva (mm)	629,56	751,63	532,35	685,60	1007,74	521,84	1266,79	1522,97	1003,35
ET0 (mm)	1693,69	1814,01	1632,13	1627,01	1680,17	1558,13	1571,48	1590,57	1554,90
Chuva ET0 ⁻¹	0,37	0,45	0,29	0,42	0,65	0,31	0,81	0,97	0,64
Altitude (m)	568,21	1016,00	328,00	307,77	459,00	170,00	165,00	246,00	92,00
NDVI	0,50	0,68	0,30	0,45	0,68	0,31	0,60	0,68	0,52

Em relação à evapotranspiração, a região I apresenta valores superior às outras regiões, isso pode ser explicado pela área ser caracterizada por elevadas temperaturas e baixa umidade relativa, ao contrário da região III, que apresentar-se com valores mais baixos.

De todo modo, esses parâmetros climáticos afetam diretamente o rendimento hídrico das bacias hidrográficas, da umidade atmosférica, da determinação da capacidade de reservatórios, do regime de chuvas, entre outros, e para um melhor entendimento desses processos, seria necessário um estudo dos sistemas climáticos que influenciam as três regiões.

A Região I apresenta chuvas com média anual de 605 mm e evapotranspiração com média de 1.687 mm. A Região II apresenta chuvas com média anual de aproximadamente 634 mm e evapotranspiração com média de 1.622 mm. A Região III apresenta chuvas com média anual de 1.428 mm e evapotranspiração com média de 1.568 mm.

Os valores das variáveis concernentes a cada região são característicos da posição geográfica que cada uma ocupa, que define as suas particularidades físico-climáticas.

2.4 CONCLUSÕES

Os métodos de *hkmeans*, utilizando a distância como medida de similaridade, apresentou bons resultados na identificação de regiões homogêneas físico-climáticas e de vegetação (NDVI) para toda a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru – BHRI.

A aplicação da técnica de agrupamento hierárquico combinado com o *k-means*, utilizando índices físico-climáticos e de vegetação evidenciou a existência de três regiões semelhantes na Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru. Em síntese essa técnica da análise multivariada mostrou-se como uma importante ferramenta para definição de diferentes regiões com maior ou menor potencialidades climáticas e de sensoriamento remoto para os diversos fins como na aplicação de regionalização de vazões, escolha de região para melhor cultivo de culturas de subsistência, entre outras.

Este agrupamento representou a realidade do comportamento climático das regiões homogêneas da bacia hidrográfica, podendo, dessa forma, contribuir com estudos futuros relacionados aos assuntos climáticos, que possam vir a ser realizados por acadêmicos, instituições e órgãos públicos, nesta região, fortalecendo, assim, o auxílio no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

3 ARTIGO II: Regionalização das Vazões Mínimas, Médias e Máximas na Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru-BA

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui a maior reserva hidrológica em água potável mundial, são cerca de 12% do total, porém, sua distribuição espacial não ocorre de forma uniforme. A bacia Amazônica por exemplo, detém aproximadamente 70% de todo o recurso hídrico do país (ANA, 2018) e uma baixa densidade demográfica. Portanto, uma adequada gestão e manejo dos recursos hídricos deve ser preconizado no restante do país, principalmente na região Nordeste, caracterizada por apresentar uma baixa disponibilidade hídrica natural. Com base no exposto acima, o plano de recursos hídricos deve assegurar a disponibilidade hídrica mínima necessária para atender os mais diversos uso da água existente em uma determinada bacia. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelecida com base na Lei nº 9433/97 (Brasil, 1997), utiliza a outorga dos direitos de uso da água como um dos principais instrumentos para garantir a segurança hídrica de uma determinada bacia ou região.

Por isso, estabelecer os excedentes de vazões, conhecer o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e evitar conflitos gerados pelos diversos usos, classificados em consuntivos (irrigação agrícola, abastecimento público e industrial) e não consuntivos, como os aproveitamentos hidrelétricos, é função primordial da gestão de recursos hídricos na distribuição adequada desses recursos (Pereira, 2012; Rego, 2013). Peça fundamental para o planejamento dos usos múltiplos das águas e ao mesmo tempo, um grande desafio para os gestores dos recursos hídricos (Pereira, 2012).

Para conceder a outorga dos direitos de uso da água, torna-se necessário, dentre outras coisas, quantificar as vazões, feita a partir dos dados coletados em estações fluviométricas localizadas em seções específicas da hidrografia. Assim sendo, na intenção de quantificar as vazões em locais sem dados, com o propósito de reduzir as incertezas nos processos de caracterização e tomada de decisão, pode-se lançar mão da metodologia de regionalização de vazões, que se caracteriza por uma variedade de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar os dados de uma variável dependente, como a vazão (Pessoa, 2015). Uma das principais metodologias de regionalização de vazões envolve a implantação e operação de redes hidrométricas e caracterização geomorfológica das áreas hidrográficas, para posteriormente transferir as informações hidrológicas obtidas de uma região com dados para uma outra com ausência de dados, com base que as regiões são homogêneas

quanto às suas características similares (Nerc, 1975; Eletrobrás, 1985; Euclydes et al. 2001; Naghettini; Pinto, 2007; Pessoa, 2015).

De acordo com Souza (2009), dentre as informações essenciais para a quantificação de vazões utilizando metodologias de regionalização estão as vazões mínimas que estão diretamente relacionadas ao conhecimento da disponibilidade hídrica; vazões médias que se relacionam ao potencial de regularização da vazão do rio; e vazões máximas, que afetam diretamente a segurança da população e os empreendimentos econômicos no interior das bacias. Diversos estudos de regionalização de vazões têm sido realizados, como o de Andrade et al. (2004), aplicado no Estado do Ceará, Lopes et al. (2016), aplicado no Paraná, Barbosa et al. (2005) e GPRH-UFV/IGAM (2012), desenvolvido no Estados de Minas Gerais, dentre diversos outros.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar as equações regionalizadas para estimativa das vazões mínimas, médias e máximas que melhor se ajustem às regiões homogeneamente físico-climáticas na bacia hidrográfica do rio Itapicuru-BA.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

Fixada na porção nordeste do estado da Bahia (Figura 6), a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru (BHRI) localiza-se nas latitudes 10° e 12°S e longitudes 41° e 37°W, ocupando uma área de mais de 37 mil km² e abrangendo na sua totalidade 49 municípios. Na porção norte, é limitada pelas bacias dos rios Real e Vaza Barris, ao sul, com as bacias dos rios Paraguaçu e Inhambupe, oeste, pela bacia do rio São Francisco e, leste, pelo Oceano Atlântico (Purificação et al, 2016).

De acordo com Purificação et al. (2016), o clima da bacia caracteriza-se como semiárido (de 7 a 8 meses secos) a úmido (subseco), com pluviosidade variando de 1000 mm/ano na serra da Jacobina, a 1500 mm ano⁻¹ na região da costa e de menor pluviosidade na região central (400 a 600 mm ano⁻¹).

Sua geomorfologia é marcada predominantemente de Pediplanos retocados ou funcionais que se caracteriza pelos Tabuleiros interioranos com altitudes em torno de 500m e refletem interferências estruturais sobre o entalhamento dos canais, além dos Pediplanos Cimeiros e Sertanejos, Serras e Maciços Residuais, bem como Tabuleiros e formas de dissecação e aplainamento embutidos, relacionado às porções da Bacia do Recôncavo (Radambrasil, 1983). Os solos que predominam na bacia são as classes dos Planossolos, Latossolos e Argissolos, com ocorrência de Neossolos, Cambissolos, dentre outras classes.

Sua vegetação é marcada, predominantemente, pela caatinga arbustiva, caatinga parque e campo rupestre, com ocorrências da Floresta Estacional, formações pioneiras com influência fluvio-marinha e vegetação secundária de Mata Atlântica nas regiões dos Tabuleiros costeiros (RPGA, 2018; Radambrasil, 1983). Quanto à sua geologia, a mesma pode ser dividida em três segmentos em função das características hidrogeológicas, sendo, portanto, Domínio das rochas do embasamento; Domínio da bacia do recôncavo; 3) Domínio das coberturas e depósitos recentes (Purificação et al., 2016).

O rio Itapicuru possui como principais afluentes os rios Itapicurú-mirim, Itapicurú Açú, rio do Peixe, rio Cariaçá, e rio Quijingue (Figura 6). O rio principal, Itapicuru, nasce nos municípios de Miguel Calmon e Pindobaçu e desagua no município do Conde, no Oceano Atlântico (Purificação et al., 2016).

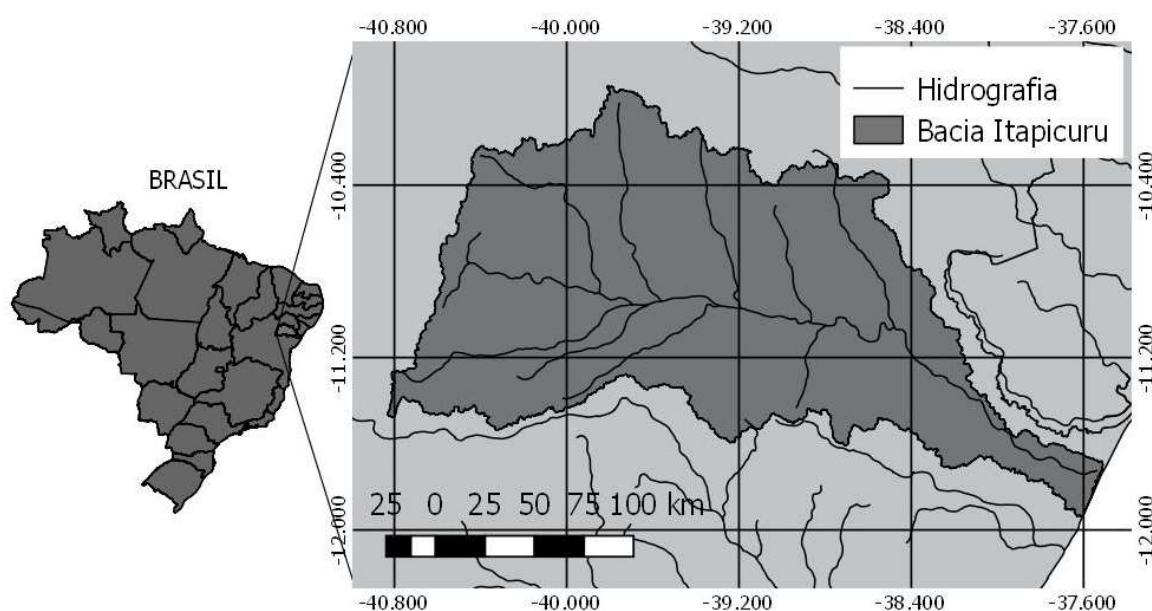


Figura 6. Mapa da Bacia do Rio Itapicuru. Fonte: Autor (2019)

3.2.2 Base de dados climáticos e de relevo

Foram utilizados dados históricos (1980 a 2013) diários de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração potencial (ET₀) de 82 pontos de grade inseridos no contexto da bacia, todos em milímetros (Figura 2). A partir destes, a relação entre P e ET₀ também foi estimada. Posteriormente, os dados climáticos pontuais foram integrados para a escala anual. Os dados climáticos foram obtidos a partir do estudo realizado por Xavier et al. (2015).

Os dados de relevo (altitude) foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Com resolução espacial de 90 m e escala equivalente a 1:250.000 (Sreedevi et al., 2009), estes dados estão disponíveis no site da Agência Espacial Americana (NASA).

3.2.3 Dados de sensoriamento remoto (SR)

Foi utilizado no estudo o Índice da Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN). Este índice realça o componente espectral da vegetação por meio da combinação das bandas espectrais do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP) (Equação 1). Sendo mais sensíveis às variações da estrutura do dossel do que as bandas individuais do sensor, podendo variar de -1, áreas sem vegetação, a +1, áreas com vegetação.

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1)$$

em que,

V: banda espectrais do vermelho; e

IVP: banda espectral do infravermelho próximo.

Este índice está disponível em uma ferramenta gratuita desenvolvida pela Embrapa Informática Agropecuária, chamada Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg). Este sistema se destina à observação e análise dos seus perfis temporais de NDVI, permitindo ao usuário observar o comportamento da vegetação na superfície terrestre ao longo do tempo (EMBRAPA, 2016). As séries de dados NDVI foram baixadas da plataforma da EMBRAPA para cada um dos 82 pontos de grade climático inserido na bacia. As imagens obtidas são provenientes do sensor *Moderate* Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua. Nestes, os NDVIs são disponibilizados em composições máximas de 16 dias, com resolução espacial de aproximadamente 250 m.

3.2.4 Dados fluviométricos

Adotaram-se as séries históricas de dez estações fluviométricas que possuem banco de dados de vazões disponíveis no sistema HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), localizadas no território da BHRI (Figura 7). Na Tabela 3 são apresentadas as informações das estações utilizadas no presente estudo.

Vale ressaltar que a grande diferença entre os números de estações cadastradas e estações com dados disponíveis se deve ao fato de que muitas foram desativadas por diversos motivos, inconsistência na continuidade de vazões, influência de dragagens, entre outros problemas de operação das estações, reduzindo o número de estações para monitoramento dos rios na região da bacia hidrográfica.

Todas as estações disponíveis com dados de vazão diária possuíam período de funcionamento, com dados consistidos, superior a dez anos civis contendo ou não falhas na sua série. Os meses que apresentavam falhas superiores a 30% do período mensal foram retirados.

Tabela 3. Informações das estações fluviométricas adotadas para este estudo. Fonte: Autor (2019)

Nome	Código	Rio	Responsável	Período	Latitude	Longitude
Pindobaçu	50330000	Itapicuru-Açu	ANA	1934 – 2010	-10,8017	-40,3800
Ponto Novo	50380000	Itapicuru-Açu	ANA	1968 – 2014	-10,845	-40,1128
Jacobina	50420000	Itapicuru-Mirim	ANA	1934 – 2014	-11,2114	-40,4703
Pedras Altas	50430000	Itapicuru-Mirim	ANA	1968 – 2014	-11,1822	-40,0467
Queimadas	50465000	Itapicuru	ANA	1934 – 2014	-10,9733	-39,6328
Ambrósio	50494000	Itapicuru	ANA	1984 – 2014	-10,9981	-39,2244
Pte Euclid da Cunha	50520000	Itapicuru	ANA	1966 – 2014	-11,0603	-38,8372
Cipó	50540000	Itapicuru	ANA	1934 – 2014	-11,0983	-38,5131
Fazenda Trianon	50591000	Itapicuru	ANA	1989 – 2004	-11,6636	-37,9361
Usina Altamira	50595000	Itapicuru	ANA	1964 – 2014	-11,7347	-37,8033

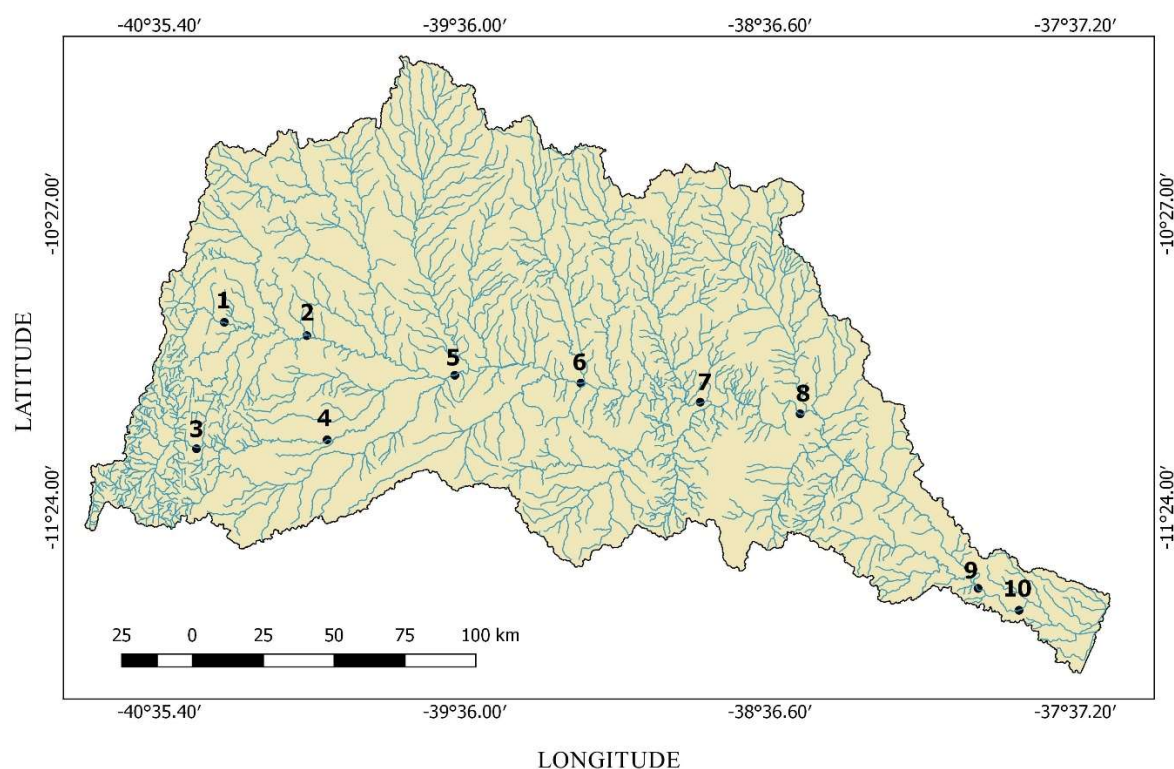


Figura 7. Distribuição espacial dos 10 postos fluviométricos na BHRI (1-Pindobaçu, 2-Ponto Novo, 3-Jacobina, 4-Pedras Altas, 5-Queimadas, 6-Ambrósio, 7-Ponte Euclides da Cunha, 8-Cipó, 9-Fazenda Trianon, 10-Usina Altamira). Fonte: Autor (2019)

3.2.5 Estimativa das Vazões

Para a obtenção e processamento das series históricas de vazão, foi usado o Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH), desenvolvido pela Universidade de Viçosa (UFV) (Souza, 2009), por meio do qual obtiveram-se os valores das vazões máximas, médias e mínimas, escolhendo-se para esta a $Q_{7,10}$ que é a vazão de sete dias de duração com dez anos de recorrência, em cada uma das estações fluviométricas. Foi utilizado o seguinte procedimento:

1. Pré-processamento: neste estudo, considerou-se uma tolerância de até 30% de falhas anuais;
2. Análise de estacionariedade: verificação da identidade da variância e da média de dois sub-períodos distintos de uma série hidrológica, por meio dos testes F (Fisher) e T de Student com testes sucessivos de agrupamento mínimo de 5 anos em combinações contínuas para todas as possibilidades de agrupamento na série. No módulo de estacionariedade do SisCAH, considerou-se nível de significância de 5%, para a rejeição ou não rejeição das hipóteses. Lembrando que o estudo da estacionariedade deve ser empregado como um instrumento de agregação de informações e de análise comparativa, mais do que simplesmente um teste de rejeição de hipóteses; e
3. Ajuste de funções de densidade de probabilidade (FDP): ajuste de diferentes FDP's e verificação de qual apresentou melhor ajuste a cada série de vazões extremas.

As vazões de referência regionalizadas neste estudo foram as vazões mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), vazões médias de longa duração (Q_{mld}) e vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos (Q_{max10}), todas em $m^3 s^{-1}$.

Foram estimados eventos associados ao determinado período de retorno (Equação 2), para as seguintes FDP's: Gumbel, Log-Normal tipo II, Log-Normal tipo III, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull, esta última utilizada para as vazões mínimas (KITE, 1988; PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006), considerando-se parâmetros como: erro padrão, média, variância, alfa (α), assimetria, beta (β), entre outros.

$$M = \mu + K * \sigma \quad (2)$$

em que,

M: magnitude do evento estimado, associado ao período de retorno;

μ : média dos eventos;

K: fator de frequência; e

σ : desvio padrão dos eventos.

O fator de frequência foi obtido conforme as funções de distribuição de frequência já mencionadas sendo que cada FDP possui uma equação para calcular o fator de frequência.

Para identificar a FDP com melhor ajuste em cada caso, foram calculados intervalos de confiança com 95% de probabilidade (Equação 3). Por este critério, considerou-se com melhor ajuste a FDP que possui menor erro padrão, ou seja, menor intervalo de confiança para a vazão estimada.

$$IC = -1,96 * \delta < M < 1,96 * \delta \quad (3)$$

Em que,

IC: intervalo de confiança com 95% de probabilidade; e

δ : erro padrão pertinente a cada função de probabilidade.

O intervalo de confiança varia em função do período de retorno, ou seja, a escolha da melhor FDP pode variar de acordo com o período de retorno adotado (NAGUETTINI e PINTO, 2007).

Nas Tabela 4, 5 e 6 pode-se visualizar as vazões máximas, médias e mínimas, respectivamente, de cada estação, assim como a escolha da melhor distribuição de análise estatística.

Tabela 4. Valores da vazão máxima das estações fluviométricas e distribuição adotada. Fonte: Autor (2019)

Nome da Estação	Código	Distribuição	$Q_{máx10} (m^3 s^{-1})$
Pindobaçu	50330000	Gumbel	123,04
Ponto Novo	50380000	Lognormal 3	123,75
Jacobina	50420000	Gumbel	161,53
Pedras Altas	50430000	Gumbel	88,13
Queimadas	50465000	Lognormal 3	393,41
Ambrósio	50494000	Lognormal 3	607,57
Ponte Euclides da Cunha	50520000	Gumbel	853,24
Cipó	50540000	Lognormal 3	696,00
Fazenda Trianon	50591000	Lognormal 3	604,02
Usina Altamira	50595000	Lognormal 3	537,76

Tabela 5. Valores da vazão média das estações fluviométricas e distribuição adotada. Fonte: Autor (2019)

Nome da Estação	Código	Q_{mld} ($m^3 s^{-1}$)
Pindobaçu	50330000	2,8281
Ponto Novo	50380000	6,8327
Jacobina	50420000	2,5624
Pedras Altas	50430000	2,3924
Queimadas	50465000	13,7767
Ambrósio	50494000	13,8823
Ponte Euclídes da Cunha	50520000	18,8882
Cipó	50540000	17,6635
Fazenda Trianon	50591000	20,3581
Usina Altamira	50595000	26,4042

Q_{mld} : vazão média de longa duração

Tabela 6. Valores da vazão mínima das estações fluviométricas e distribuição adotada. Fonte: Autor (2019)

Nome da Estação	Código	Distribuição	$Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$)
Pindobaçu	50330000	Logpearson 3	0,03
Ponto Novo	50380000	Logpearson 3	0,03
Jacobina	50420000	Logpearson 3	0,00
Pedras Altas	50430000	Logpearson 3	0,00
Queimadas	50465000	Logpearson 3	0,04
Ambrósio	50494000	Lognormal 3	0,00
Ponte Euclídes da Cunha	50520000	Logpearson 3	0,00
Cipó	50540000	Logpearson 3	0,53
Fazenda Trianon	50591000	Logpearson 3	1,77
Usina Altamira	50595000	Logpearson 3	1,72

3.2.6 Definição das regiões homogêneas

A definição das regiões hidrológicamente homogêneas foi realizada com base na análise estatística multivariada de agrupamento. Foram considerados na análise de agrupamento os dados físico climáticos da bacia para cada ponto de grade, altitude, precipitação pluvial, evapotranspiração potencial e a relação entre a chuva e a evapotranspiração. Além destas informações, os valores de NDVI também foram considerados para cada ponto de grade. Para a determinação das regiões hidrológicamente homogêneas, foi utilizado a combinação dos métodos de análise de agrupamento *clustering* hierárquico e *k-means*, uma aplicação fornecida usando ferramentas através do software R (R Cores Team, 2015). Esse processo é denominado *clustering* híbrido *k-means* hierárquico ou *hkmeans* (GALILI, 2016).

O procedimento realizado foi dividido em: (1) computou-se o agrupamento hierárquico e aplicou-se o corte na árvore em *k-clusters*; (2) calculou-se o centro de cada cluster; e (3) calculou-se *k-means* usando o conjunto de centros de cluster como os centros de cluster iniciais. Este método baseou-se no critério maior distância para fazer a segregação dos grupos, compostos por 82 pontos da grade de dados climáticos inseridos na bacia.

3.2.7 Variáveis Explicativas ou Independentes

As características fisiográficas quantificáveis, tal como a área de drenagem e altitude, e a precipitação total anual média, Evapotranspiração total anual média, Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), foram as grandezas utilizadas como variáveis independentes ou explicativas na análise de regressão da variável dependente. Neste trabalho as grandezas mencionadas acima foram todas calculadas para cada área de drenagem das sub-bacias selecionadas, através da utilização do Software de geoprocessamento (Quantum GIS 2.18.14) com bases cartográficas (QGIS Development Team, 2019).

As coordenadas das estações acompanhadas dos dados fluviométricos foram obtidas a partir do cadastro/inventário obtido na plataforma HidroWeb (ANA, 2018).

Inicialmente as áreas de drenagem de cada estação foram obtidas limitando-se estas manualmente no Quantum GIS, utilizando-se a hidrografia e a altimetria disponíveis em toda a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru na escala 1:250.000.

Os dados climáticos (precipitação e evapotranspiração) foram obtidos a partir do estudo desenvolvido por Xavier et al. (2015), como mencionado no Item 3.2.2.

Os valores de altitude foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Com resolução espacial de 90 m e escala equivalente à 1:250.000 (SREEDEVI et al., 2009).

As séries de dados NDVI foram baixadas da plataforma da Embrapa, disponível em seu *site*. As imagens obtidas são provenientes do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo dos satélites Terra e Aqua. Nestes, os valores NDVIs são disponibilizados em composições máximas de 16 dias, com resolução espacial de aproximadamente 250m.

3.2.8 Estações fluviométricas

Na Figura 8, pode-se visualizar a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru e as dez Sub-bacias que compõem a área de estudo. Vale ressaltar que as bacias à montante se sobrepõem nas bacias à jusante, percebendo maior área na bacia mais à jusante.

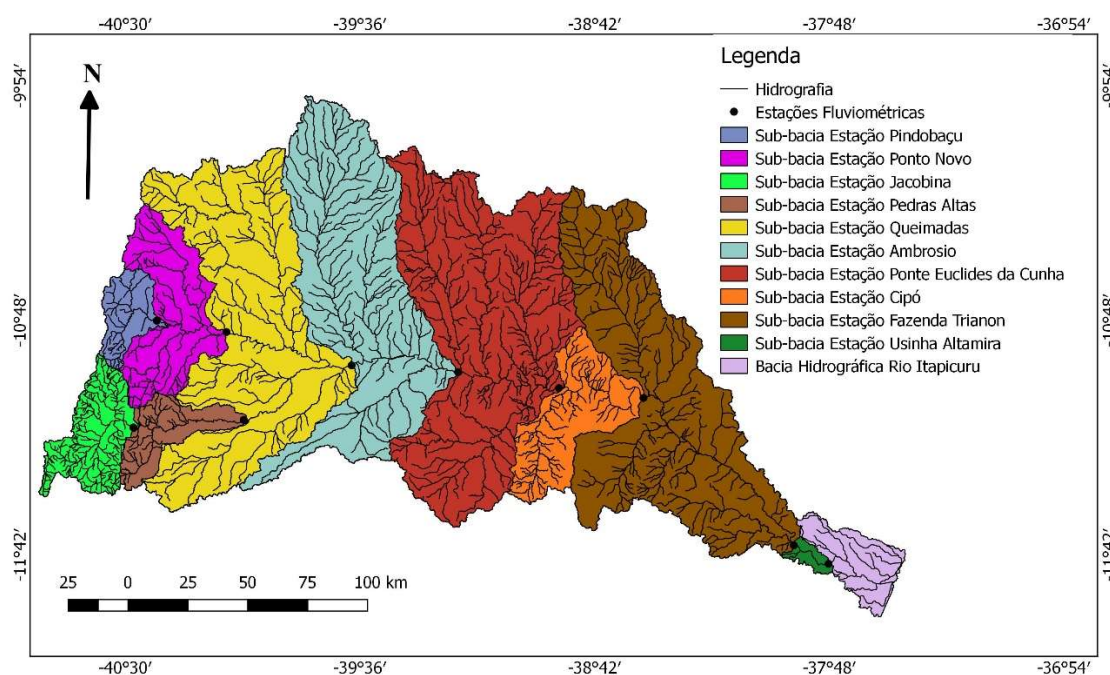


Figura 8. Área da bacia hidrográfica do rio Itapicuru e as dez Sub-bacias que a envolve. Fonte: Autor (2019)

3.2.9 Ajuste dos modelos

Os modelos de predição de vazão foram ajustados a partir da escolha dos melhores subconjuntos de variáveis explicativas, através da função *regsubsets* e pelo algoritmo *exhaustive* presente no pacote “leaps” do software R. Ao invés de listar todas as possíveis regressões com as 11 variáveis candidatas a preditoras, a função *regsubsets* lista os k-melhores modelos, segundo o Critério de Informação Bayesiana (BIC) que é um método que exclui parâmetros nos modelos, procurando alcançar o modelo mais parcimonioso possível para subgrupos de preditoras de todos os tamanhos (desde uma até onze variáveis explicativas) utilizado conjuntamente com a menor soma do quadrado da soma (s^2). Além de mostrar as melhores regressões, a função também retorna os valores mínimos de BIC e s^2 , e do coeficiente de determinação (r^2) ajustado para cada regressão. Essas foram utilizadas como critérios de seleção dos modelos, pois é desejado modelo com o menor valor de BIC e de s^2 e r^2 ajustado

próximo da unidade, pois quanto este for mais próximo da unidade, tanto melhor será a validade da regressão, associadas à menor quantidade de parâmetros por modelo (AMARAL et al., 2009). Esses parâmetros lidam com a seleção de modelos, no caso o Critério de Informação Bayesiano (BIC) penaliza a complexidade extra, o que significa que a inclusão de uma variável extra independente deve melhorar o modelo o suficiente para justificar sua inclusão (Reis Jr., 2005).

Posteriormente, parte-se para a escolha das melhores variáveis explicativas para cada tipo de vazão analisada, os coeficientes dos modelos foram avaliados com uso do teste t de Student, a 1%, 5% e, em alguns casos, 0,1% de probabilidade (AMARAL et al., 2009).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Regiões Hidrológicamente Homogêneas

A Figura 9 apresenta as regiões homogêneas e as suas respectivas estações fluviométricas para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru.

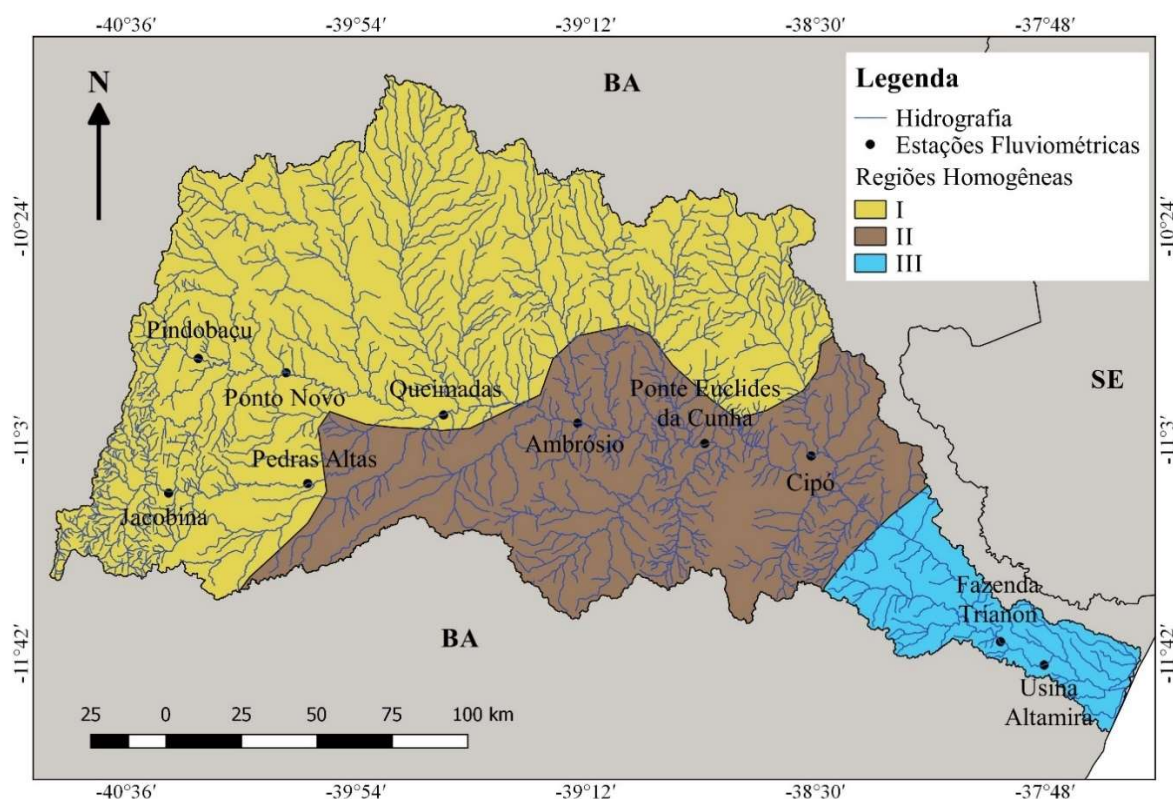


Figura 9. Regiões homogêneas e as suas respectivas estações fluviométricas para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru. Fonte: Autor (2019)

A bacia foi dividida em três regiões homogêneas, baseando-se na similaridade das características de relevo e clima para cada região homogênea por meio da análise estatística multivariada de agrupamento *hkmeans*, identificando-as para as vazões máxima, mínima e média.

Estudo realizado por Mestrinho (2008) na bacia do rio Itapicuru, determina que a dinâmica das condições hidrológicas delineiam a divisão da bacia em Ambientes Hidrológicos (AH), onde a influência de vários fatores, tais como: precipitação, evapotranspiração, radiação solar, relevo, geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal e uso do solo, ações antrópicas sobre o sistema fluvial caracteriza uma separação da bacia hidrográfica em regiões homogêneas.

De acordo com a Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia - SEI (2006) a bacia hidrográfica do rio Itapicuru apresenta o predomínio do clima úmido a subúmido no litoral, diminuindo gradativamente a pluviosidade e índice de umidade na medida que se interioriza na bacia, corroborando à distinção de várias regiões por faixas climáticas.

Conforme determinado em estudos por Mestrinho (2008) e Lima (2017), a região I, que compreende a porção mais elevada da bacia e apresenta cinco estações fluviométricas, possui maior pluviometria e tipos de solo e vegetação que ajudam na retenção de água promovendo o aumento das vazões específicas que permanecem por mais tempo, mesmo que ocorra alguma intermitência no escoamento; a região II, que compreende a porção média da bacia e apresenta três estações fluviométricas, aponta uma área mais seca; e a região III, que compreende a porção costeira da bacia e apresenta duas estações fluviométricas com elevados índices pluviométricos do clima semiúmidos e aporte dos sistemas aquífero influenciando no escoamento superficial são evidenciados como os principais parâmetros na determinação das regiões homogêneas.

As estimativas de equações de regionalização de vazão foram realizadas para a bacia do rio Itapicuru como um todo com base nas dez estações fluviométricas e para região homogênea I, com base nas suas cinco estações de medição de vazão. Em contrapartida, as regiões II e III tornaram-se inviáveis estaticamente para as estimativas de equações de regionalização de vazão.

Esse fator é caracterizado por Baena et al. (2004) que ressalta a deficiência de estações fluviométricas (insuficiência de dados fluviométricos e/ou distribuição geográfica das estações) para uma região, como no caso das regiões II e III, que impossibilita o ajuste das equações de regressão múltipla.

3.3.2 Estacionariedade

As vazões máximas ($Q_{\max 10}$), médias (Q_{mld}) e mínimas ($Q_{7,10}$) foram as variáveis regionalizadas neste trabalho. Foram utilizados séries de dados consistidos, desta forma, todos os dados possíveis foram coletados da Plataforma HidroWeb (ANA, 2018) e pré-selecionadas com mais de dez anos de vazão fluvial. Neste estudo, foi utilizado o *Software R* para realizar a análise de regressão linear e correlação das equações da bacia hidrográfica do rio Itapicuru através das variáveis independentes (grandezas físico-climáticas e vegetação), quantificáveis, mencionadas no Item 3.2.7 deste trabalho.

As estações fluviométricas analisadas obtiveram resultados satisfatórios nos testes de estacionariedade de médias e de variâncias da vazão, por meio do teste T (para as médias) e o teste F (para as variâncias), a 5% de significância para aceitar a hipótese nula de que a série é homogênea, ou seja, que não há tendência contra a hipótese alternativa de existência de tendência. Neste caso, foram considerados apenas resultados dos testes unilaterais, por considerar que a avaliação de outros limites apenas agregaria informações para análise de sensibilidade da problemática.

Ressalta-se que as séries utilizadas para calibração apresentaram hipóteses aceitas, ou seja, estacionárias em relação às séries de base atual, sem registros de mudanças na curva-chave das estações fluviométricas, confirmando que os dados dos mesmos, mostraram-se satisfatórios aos tamanhos das séries apresentadas por cada estação para as vazões máximas, médias e mínimas, resultando em qualidade suficiente para as etapas subsequentes.

Tal ocorrido é caracterizado em Latuf (2011), onde a verificação de estacionariedade é realizada com o objetivo da identificação de possíveis mudanças de tendências cujos resultados demonstrados como estacionários, expressa que não há mudanças estatisticamente significativas, ao nível de 5% de probabilidade pelos testes T e F, para as vazões, dando início, desta maneira, às etapas de processamento de dados.

Nos casos de rejeição no teste, foram avaliados os padrões e tendências, verificando-se o ponto de quebra, como o período que melhor demarca a diferença de estacionariedade de acordo com a comparação do desvio padrão dos períodos contrastantes.

De acordo com Vasco (2015), em seus resultados, associa a não-estacionariedade em séries de vazão, a fatos, principalmente, antrópicos e de variabilidade climática interdecadal, como, por exemplo, as mudanças climáticas ocasionadas pelo uso de solo.

Em estudo realizado por com Vasconcelos et al. (2013) os bons resultados para os testes de estacionariedade de vazão trazem uma confiabilidade adicional para o preenchimento de falhas, onde a rejeição em hipóteses de estacionariedade proposta por meio de quebra da estacionariedade não se apresente como um impedor mandatório frente à confiança em resultados de trabalhos realizados, a fim de servir como um critério adicional ao apoio ao preenchimento de falhas.

3.3.3 Modelos de regionalização de vazões

A Equação Linear Múltipla (4) foi empregada para determinar os resultados dos modelos de regressão deste trabalho.

$$Q = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (4)$$

em que,

Q: vazão característica de interesse, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

β_i : coeficientes variáveis independentes; e

X_i : variáveis independentes consideradas.

Os resultados para os modelos de regionalização de vazões serão descritos separadamente entre as vazões máximas, médias e mínimas.

Em todos os modelos, analisou-se o menor valor de Bayesian Information Criterion (BIC) em conjunto com análise da menor soma do quadrado residual (s^2) do modelo. Os coeficientes de determinação (r^2) encontrados possuem os melhores valores em relação aos parâmetros estatísticos BIC e s^2 . Para todas as regiões (Tabela 7, 8, 9, 10, 11 e 12), selecionou-se o modelo que satisfizesse essas premissas, que em relação ao ajuste linear, apresentam um bom ajuste.

3.3.3.1 Modelo de Regionalização de Vazões Máximas

A Tabela 7 mostra o resultado obtido através da seleção do algoritmo “exhaustive” no software R para o ajuste da equação de regionalização para a vazão máxima ($Q_{\text{máx10}}$), onde demonstra o melhor modelo ajustado de acordo com os parâmetros estatísticos.

Tabela 7. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{máx10}}$ para todas as regiões. Fonte: Autor (2019)

Coeficiente	Estimado	Desvio padrão	Valor de t	Pr(> t)	Nív. Significância
Intercepto	-2,836e+05	6,715e+04	-4,224	0,013434	0,05
Pmed	-3,933e+02	9,567e+01	-4,111	0,014719	0,05
ET0med	+1,787e+02	4,039e+01	+4,424	0,011477	0,05
ET0mín	-8,737e+00	9,476e-01	-9,221	0,000769	0,001
P ET0max ⁻¹	-2,684e+03	5,712e+02	-4,700	0,009311	0,01
P ET0méd ⁻¹	+6,593e+05	1,610e+05	+4,096	0,014897	0,05

Pmed = precipitação média; ET0med = evapotranspiração média; ET0min = evapotranspiração mínima; P ET0max-1 = relação entre precipitação e a evapotranspiração máxima; P ET0med-1 = relação entre precipitação e a evapotranspiração média.

De acordo com Amaral et al. (2009), a escolha do melhor modelo de regressão ajustado deve ser realizada considerando-se o menor número possível de variáveis explicativas, baseados nos melhores métodos de previsão. Este trabalho utilizou o Critério de Informação Bayesiana, a soma do quadrado residual e o coeficiente de determinação. Depois de os modelos serem ajustados, a significância dos seus respectivos coeficientes foi avaliada a partir do teste t de Student. Ao realizar a análise de significância dos coeficientes dos modelos ajustados para a vazão máxima para toda a bacia do rio Itapicuru, foi escolhido o modelo com cinco variáveis explicativas (precipitação média, evapotranspiração média e mínima, máximo da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial e a média da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial). Os coeficientes do modelo com menor quantidade de variáveis explicativas não foram significativos ao nível de 0,1%, 1% e 5% de probabilidade.

Portanto, tendo em vista que se queria obter um modelo mais parcimonioso, o ajuste com as cinco variáveis preditivas listadas na Tabela 7 apresentou o melhor resultado estatístico ($r^2 = 0,98$, $s^2 = 0,05$ e $BIC = -35,45$), onde foi possível obter a seguinte Equação (5):

$$Q_{max10} = 283.600 + P_{med} * (-393,300) + ET0min * (178,700) + ET0min * (-8,737) + P ET0max^{-1} * (-2.684) + P ET0med^{-1} * (659.300) \quad (5)$$

em que,

Q_{max10} : vazão máxima associada a períodos de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

P_{med} : precipitação média, em mm;

$ET0med$: evapotranspiração média, em mm;

$ET0min$: evapotranspiração mínima, em mm;

$P ET0max^{-1}$: relação entre precipitação e a evapotranspiração máxima, adimensional;

$P ET0med^{-1}$: relação entre precipitação e a evapotranspiração média, adimensional.

De forma análoga aos resultados da regionalização de toda a bacia, os resultados obtidos através da seleção do algoritmo “exhaustive” no software R para o ajuste da equação de regionalização para a vazão máxima ($Q_{máx10}$) para a região homogênea I são apresentados na Tabela 8. O modelo também foi ajustado com o menor valor de Bayesian Information Criterion (BIC), menor valor da soma do quadrado residual (s^2) e com o coeficiente de determinação (r^2) mais próximo da unidade.

Tabela 8. Modelo de Regressão para a $Q_{\text{máx}10}$ para a região I. Fonte: Autor (2019)

Coeficiente	Estimado	Desvio padrão	Valor de t	Pr(> t)	Nível Significância
Intercepto	66,924764	25,130585	2,663	0.07614	0,01
Área	0,027272	0,004464	6,109	0.00881	0,01

A = Área da região.

Ao realizar a análise de significância dos coeficientes dos modelos ajustados para a vazão máxima para a região homogênea I da bacia do rio Itapicuru, foi escolhido o modelo com uma variável explicativa, a área. O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Portanto, tendo em vista que se queria obter um modelo mais parcimonioso, o ajuste encontrado na Tabela 8 apresentou o melhor resultado estatístico com $r^2 = 0,91$, $s_2 = 0,16$ e BIC = -9,77, onde foi possível obter a seguinte Equação (6):

$$Q_{\text{max}10} = 66,9250 + A * (0,0273) \quad (6)$$

em que,

$Q_{\text{max}10}$: vazão máxima associada a períodos de retorno de 10 anos, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

A: área da região, em km^2 .

Através da análise das equações obtidas para a regionalização das vazões máximas, os ajustes para a toda a região da bacia e para a região homogênea I apresentaram os melhores modelos restritivos para cada área, evidenciados pelos coeficientes de correlação acima de 0,85 (85%). Pelas Tabelas 7 e 8 observou-se que as significâncias de t foram satisfatórias. Assim sendo, em função dos testes estatísticos aplicados, obtiveram-se as melhores equações para se estimar as vazões máxima para as regiões.

Pode-se observar que a região correspondente à região homogênea I situa-se na área de nascente, apresentando elevada altitude, em direção à parte central da bacia hidrográfica, sendo a mesma representativa das regiões próximas a serra de Jacobina (Purificação et al., 2016; Silva e Fontes, 2017). É na região I que se encontra a nascente do curso d'água do rio Itapicuru. Esses fatores que caracterizam uma boa homogeneidade de regiões podem confirmar a teoria que uma variável pode apresentar maior peso e possuir significância suficiente em relação às demais variáveis não inseridas no modelo.

Já a região definida pela totalidade da bacia, abrange toda a área que recebe a influência de três variações climáticas (zona tropical, a zona seca e a zona subtropical úmida) de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). Essa ampla variação de climática e de relevo pode ter interferido no ajuste de mais variáveis explicativas no modelo.

Para a totalidade da bacia hidrográfica do rio Itapicuru obteve-se uma quantidade de cinco variáveis (precipitação média, evapotranspiração média, evapotranspiração mínima, máximo da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial e a média da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial) e para a região homogênea I, apenas uma (área).

É relevante ressaltar que a variável NDVI não apareceu na composição de nenhum modelo de regionalização de vazões máximas, evidenciando peso insatisfatório para o ajuste estatístico das equações, resultando coeficientes de correlação inferiores aos obtidos nos modelos selecionados.

Apesar de os resultados apresentarem uma boa correlação, em relação ao caso do modelo da região homogênea I, onde obteve-se um bom ajuste com apenas uma variável explicativa, a literatura em geral Tucci (2002, 2012), CPRM (2002) entre outros, aponta que o ajuste de modelos pode ser melhorado com a inserção de uma outra variável explicativa.

3.3.3.2 Modelo de Regionalização de Vazões Médias

Assim como ocorrido para a vazão máxima para toda a bacia do rio Itapicuru, o melhor ajuste do modelo de regressão encontrado para a vazão média para toda a bacia do rio Itapicuru (Tabela 9) também apresentou a quantidade de cinco variáveis explicativas, porém, diferenciadas, tais como: precipitação máxima, média e mínima, evapotranspiração média e a média da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial. Os coeficientes do modelo com menos variáveis explicativas não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 9. Modelo de Regressão para a Q_{mld} para todas as regiões. Fonte: Autor (2019)

Coeficiente	Estimado	Desvio padrão	Valor de t	Pr(> t)	Nív. Significância
Intercepto	1,202e+04	4,166e+03	2,886	0,0447	0,05
Pmax	9,182e-02	2,250e-02	4,081	0,0151	0,05
Pmed	1,723e+01	5,908e+00	2,916	0,0434	0,05
Pmin	7,929e-02	2,356e-02	3,365	0,0282	0,05
ET0med	-7,134e+00	2,487e+00	-2,869	0,0455	0,05
P ET0med ⁻¹	-2,931e+04	9,965e+03	-2,941	0,0423	0,05

Pmax = precipitação máxima; Pmed = precipitação média; Pmin = precipitação mínima; ET0med = evapotranspiração média; P ET0med-1 = relação entre precipitação e a evapotranspiração média.

O modelo foi ajustado com $r^2 = 0,98$, $s^2 = 0,07$ e $BIC = -30,05$ para a vazão média (Q_{mld}), tendo em vista a obtenção de um modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (7):

$$Q_{mld} = 12.020 + Pmax * (0,092) + Pmed * (17,230) + Pmin * (0,079) + ET0med * (-7,134) + P ET0med^{-1} * (-29.310) \quad (7)$$

em que,

Q_{mld} : vazão média de longa duração, em $m^3 s^{-1}$;

P_{max} : precipitação máxima, em mm;

P_{med} : precipitação média, em mm;

P_{min} : precipitação mínima, em mm;

$ET0_{med}$: evapotranspiração média, em mm;

$PET0_{med}^{-1}$: relação entre precipitação e a evapotranspiração média, adimensional.

Assim como ocorrido para a vazão máxima para a região homogênea I da bacia do rio Itapicuru, o melhor ajuste do modelo de regressão encontrado para a vazão média da região homogênea I da bacia hidrográfica do rio Itapicuru (Tabela 10) também apresentou uma variável explicativa, porém, diferenciada na escolha da variável explicativa, sendo, portanto, ajustada com a evapotranspiração máxima. O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 0,1% de probabilidade.

Tabela 10. Modelo de Regressão para a Q_{mld} para a região I. Fonte: Autor (2019)

Coeficiente	Estimado	Desvio padrão	Valor de t	Pr(> t)	Nível Significância
Intercepto	-333,1328	49,0451	-6,7920	0,00014	0,001
ET0max	0,1999	0,0284	7,0500	0,00011	0,001

ET0max = evapotranspiração máxima.

O modelo foi ajustado com o menor Bayesian Information Criterion (BIC), menor valor da soma do quadrado residual (s^2) e com o coeficiente de determinação (r^2) mais próximo da unidade para a equação de regionalização da vazão média (Q_{mld}). O mesmo apresentou $r^2 = 0,85$, $s^2 = 0,19$ e BIC = -10,37, tendo em vista que se queria obter um modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (8):

$$Q_{mld} = -333,1328 + ET0max * (0,1999) \quad (8)$$

em que,

Q_{mld} : vazão média de longa duração, em $m^3 s^{-1}$;

ET0max: evapotranspiração máxima, em mm.

De acordo com o resultado apresentado para o modelo de regressão para toda a bacia do rio Itapicuru, observou-se que para a situação analisada, o valor do r^2 apresentou-se excelente, obtendo-se 0,98 para a Q_{mld} . Este resultado assemelha-se com o obtido pelo Governo de Santa Catarina (2006), onde a obtenção de elevados coeficiente de determinação permitem estimar a vazão média de longo termo com boa precisão, sem resultar em desvios.

Destaca-se que a variável NDVI mostrou-se insatisfatória para desempenho estatístico, evidenciados pelos coeficientes de correlação inferiores aos obtidos nos modelos selecionados, demonstrando, portanto, o baixo fator de impacto dessa variável no processo de modelagem estatística referida às vazões médias na bacia hidrográfica do rio Itapicuru.

Com relação ao modelo de vazões média para a região homogênea I, o coeficiente não foi tão bom quanto os demais, apresentando o valor de 0,85. No entanto, este resultado assemelha-se com o obtido por Pruski et al. (2012) ao se utilizar apenas a área de drenagem como variável explicativa e aponta que o ajuste poderia ser melhorado com a utilização de outra variável.

Vale ressaltar que a composição dos modelos de vazões máximas e dos modelos de vazões médias, apresentaram-se semelhantes, com a mesma quantidade de variáveis compondo

as suas equações. Isso pode ser caracterizado pela acurácia da homogeneização das regiões que se mostraram fiéis à regressão.

3.3.3.3 Modelo de Regionalização de Vazões Mínimas

Em relação à vazão mínima para toda a bacia do rio Itapicuru, obedecendo a premissa de Amaral et al. (2009), em que a escolha do melhor modelo de regressão ajustado deve ser realizada considerando-se o menor número possível de variáveis explicativas, dessa forma, para a regionalização da vazão mínima para toda a bacia hidrográfica, apresentou-se os melhores resultados estatísticos com apenas um parâmetros (Precipitação máxima), demonstrado na Tabela 11, com valores de $r^2 = 0,90$, $s^2 = 0,33$ e $BIC = -28,28$, tendo em vista a finalidade de obtenção do modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (9). O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 0,1% de probabilidade.

Tabela 11. Modelo de Regressão para a $Q_{7,10}$ para todas as regiões. Fonte: Autor (2019)

Coeficiente	Estimado	Desvio padrão	Valor de t	Pr(> t)	Nív. Significância
Intercepto	-1,780232	0,1685595	-10,56	5.64e-06	0,001
Pmax	0,002457	0,0001807	13,60	8.22e-07	0,001

Pmax = precipitação máxima.

$$Q_{7,10} = -1,7802 + Pmax * (0,0025) \quad (9)$$

em que,

$Q_{7,10}$: vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

P_{max} : precipitação máxima, em mm.

Em relação à vazão mínima para a região homogênea I da bacia hidrográfica do rio Itapicuru, a mesma apresentou os melhores resultados estatísticos com apenas dois parâmetros, tais como: evapotranspiração máxima e média, demonstrados na Tabela 12, com valores de $r^2 = 0,99$, $s^2 = 0,31$ e $BIC = -47,68$, tendo em vista a finalidade de obtenção do modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (10). O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 0,1% de probabilidade.

Tabela 12. Modelo de Regressão para a $Q_{7,10}$ para a região I. Fonte: Autor (2019)

Coeficiente	Estimado	Desvio padrão	Valor de t	Pr(> t)	Nível Significância
Intercepto	-2,189e+00	9,976e-03	-219,5	2,08e-05	0,001
ET0max	3,945e-04	3,486e-06	113,2	7,81e-05	0,001
ET0med	9,225e-04	7,451e-06	123,8	6,52e-05	0,001

ET0max = evapotranspiração máxima; ET0med = evapotranspiração média.

$$Q_{7,10} = -2,189000 + ET0max * (0,000395) + ET0med * (0,000923) \quad (10)$$

em que,

$Q_{7,10}$: vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

ET0max: evapotranspiração máxima, em mm;

ET0med: evapotranspiração média, em mm.

O modelo ajustado para a vazão mínima ($Q_{7,10}$) neste trabalho obteve maior desempenho extraindo-se apenas a variável explicativa precipitação máxima para toda a região da bacia do rio Itapicuru e as variáveis evapotranspiração máxima e evapotranspiração média para a região homogênea I apresentando maior êxito preditivo por delimitação de área, ou seja, distinção de modelos pela seleção de variáveis diferenciadas por cada região homogeneizada. As demais variáveis, associadas ou não, inclusive o NDVI, apresentaram desempenho estatístico inferiores, evidenciando, portanto, baixo fator de impacto dessas variáveis no processo de modelagem estatística referida à vazão nas regiões na bacia hidrográfica proposta.

No trabalho de Chaves et al. (2002) a bacia do rio Itapicuru foi regionalizada pelo Método proposto por Chaves, onde se desenvolveu uma metodologia de interpolação e extrapolação de vazões mínimas a qual apresentaram soluções que dependiam da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos, sendo a variável utilizada para a estimativa das vazões nas seções de interesse a área de drenagem, evidenciando o seu melhor modelo com apenas uma variável preditiva. Contudo, esse método apresentou limitações que contribuíram para a menor precisão observada nos seus resultados.

A limitação obtida no trabalho de Chaves et al. (2002) não foi atribuída ao fato de que o modelo apresentou apenas uma variável preditiva, mas, sim, em função do limitado número de graus de liberdade disponível naquele trabalho, ocorrendo diferentemente neste.

Veiga et al. (2011) aborda em seu trabalho um método mais avançando que o Método proposto por Chaves, denominado Método Chaves Modificado que é consistido na inserção da variável precipitação média no método proposto por Chaves et al. (2002), sendo a vazão obtida na seção de interesse proporcional ao volume precipitado nas áreas analisadas. Desse modo, o modelo do então método passaria a apresentar duas variáveis preditivas, sinalizando uma possível melhoria na sua metodologia anterior.

No trabalho desenvolvido por Virões (2013) foi regionalizada a vazão mínima para a bacia do rio Itapicuru em função das variáveis explicativas: área de drenagem e precipitação média anual destas áreas, as mesmas variáveis abordadas pelo Método Chaves Modificado. Em seu caso, recomendou o uso da equação regional restrito à área delimitada, definida em suas regiões homogêneas, e para estimativas que não requeressem muita precisão. Isso é devido à insuficiência de dados disponíveis e representativos na região de aplicação, em contrapartida, este trabalho utilizou uma metodologia proposta por Xavier et al. (2015) associada ao SIG que abordou a inserção de um total de onze variáveis explicativas, ampliando a abrangência preditiva.

Corroborando aos resultados de regionalização de vazões mínimas encontrados neste trabalho, cabe destacar que o maior ou menor número de variáveis não sinaliza uma melhoria no ajuste do modelo, todavia, uma variável em si ou associada a outras pode definir o maior peso na regressão e, usualmente, embutir as informações referentes às outras variáveis físicas. Portanto, quando as demais variáveis não apresentam significância, provavelmente a variável selecionada já teria explicado a variabilidade, devido a correlação existente entre as mesmas.

3.3.3.4 Modelo de Regionalização de Vazões para as Regiões Homogêneas II e III

Percebeu-se que a quantidade de dados de estações fluviométricas das regiões II e III apresentaram-se de forma, estatisticamente, insuficientes, visto que cada uma apresentou, respectivamente, apenas três e duas estações fluviométricas, contidas em suas áreas, procedendo à não estimação dos parâmetros existentes.

Esse fator já mencionado é caracterizado por Baena et al. (2004) como uma deficiência de estações fluviométricas, tanto na insuficiência de dados fluviométricos quanto na distribuição geográfica das estações para uma dada região, o que impossibilita o ajuste das equações de regressão múltipla.

Acredita-se que a continuidade de áreas tão extensas, assim como definidas neste trabalho, seja em decorrência da baixa densidade de postos fluviométricos distribuídos ao longo da bacia hidrográfica do rio Itapicuru. Para Andrade et al. (2004) tal fato limita a identificação das regiões hidrológicas homogêneas com uma maior acuracidade.

3.4 CONCLUSÕES

O estudo de regionalização de vazões mostrou-se um importante instrumento para o planejamento dos recursos hídricos na estimativa de dados de vazão em regiões onde se necessita de informações com agilidade, qualidade e custos adequados, tanto para estimar demanda nos seus diversos usos, como também, ter utilidade em processos de outorga de água.

Este trabalho constitui-se como uma ferramenta que incentiva o uso racional e sustentável dos recursos hídricos, de maneira que atinge o objetivo de facilidade na sua aplicação e difunde o seu uso.

Os modelos de vazões mínimas propostos neste estudo apresentam-se com desempenho superiores ao de Chaves et al. (2002) e Virões (2013) para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru. Essa melhoria pode ser explicada pelo fato que o modelo proposto utiliza dados mais recentes, uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e maior quantidade de variáveis explicativas, ocasionando maior dinâmica preditiva.

Este trabalho abrangeu a regionalização das vazões máximas, médias e mínimas. Para as máximas e médias abordaram-se, respectivamente, as vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos e as vazões médias de longa duração, tornando este trabalho pioneiro na aplicação desta metodologia na bacia hidrográfica do rio Itapicuru – BA, o que sem dúvida, potencializou o melhor desempenho do mesmo.

Os modelos propostos apresentaram maior interação com as variáveis independentes escolhidas, uma vez que cada equação de regionalização foi ajustada estatisticamente com as variáveis que melhor tivessem representação física e de predição com valores mais seguros que as demais variáveis analisadas não inseridas nos ajustes.

A variável explicativa NDVI mostrou-se menos expressiva no desenvolvimento dos modelos de regionalização de vazões propostos, não demonstrando impacto relevante em relação ao desempenho das demais variáveis.

Os resultados deste trabalho demonstraram que a maior quantidade variáveis explicativas não significa melhor representação de modelo matemático. Em todas as análises de regressões feitas observaram-se resultados satisfatórios, vistos os coeficientes estatísticos obtidos.

Esta pesquisa é considerada não estanque ao longo do tempo, devido às mudanças constantes que sofrem os cursos d'água, principalmente pela intervenção antrópica. Desta forma, implica dizer que é inevitável haver a manutenção dos estudos de regionalização, não desconsiderando a necessidade de implantação de postos climáticos e fluviométricos ao longo

da bacia hidrográfica, sendo inexorável a atualização e a conservação de rede hidrometeorológicas, que é base de sustentação deste tipo de estudo.

4 CONCLUSÃO GERAL

Considerada a importância do conhecimento das vazões fluviais na bacia hidrográfica como elemento essencial para a estimativa das potencialidades e disponibilidades hídricas de seus cursos d'água, esse trabalho apresenta os modelos de regionalização das vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos, médias de longa duração e mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos da bacia do rio Itapicuru – BA. Nos estudos foram empregadas as metodologias de regionalização hidrológica com o auxílio da ferramenta computacional SisCAH e do *software* R para a finalidade de modelagem.

As três regiões da bacia hidrográfica do rio Itapicuru resultaram da homogeneização das características dos seus fatores físico-climáticos e de vegetação em comum para cada região da bacia. O método de aplicação empregando a análise multivariada de agrupamento, por meio da técnica *hkmeans*, demonstrou verdadeira satisfação e assiduidade dos resultados para a representação da predição com base na real situação da área de estudo.

O modelo foi aplicado para toda bacia e para a região homogênea I, não aplicando-se às regiões II e III por fatores relacionados à insuficiência de dados. As regionalizações das vazões máximas, médias e mínimas foram desenvolvidas através da metodologia proposta, considerando como variáveis independentes fatores de natureza físico-climática e de vegetação da bacia hidrográfica em questão.

O rio Itapicuru apresenta-se com baixa densidade de estações fluviométricas (10 estações) possíveis de serem utilizadas, excluindo-se as demais que possuem inconsistência ou desativação de dados, resultando em um grande déficit nas questões de pesquisas hidrológicas na região da bacia. Neste contexto, sugere-se a implantação de estações nos rios afluentes mais significativos, nas regiões de cabeceiras e foz e nas regiões mais periféricas da bacia, onde não há monitoramento.

Os resultados encontrados neste estudo indicam a significativa relação entre os valores das variáveis explicativas realizadas com o auxílio do método de ajuste de modelo aplicado, evidenciados pelos coeficientes de correlação igual ou superior a 0,85 ou 85%, provando que as técnicas de sensoriamento remoto associadas à análises de regressão resultam em boas estimativas, que apresentam como vantagens o apoio ao planejamento e gestão dos recursos hídricos, mais especificamente, na melhor execução de serviços.

O produto deste trabalho é uma ferramenta útil na execução de serviços como a concessão de outorga de direito de uso de água e deve-se lembrar que caso ocorra a necessidade de se conhecer o valor da vazão nos locais onde já existam estações fluviométricas utilizadas

na determinação das regiões homogêneas I, II e III, os valores destas serão mais precisos do que a própria equação regional. Desta forma deve-se optar, não pelo cálculo, e sim pelo seu valor real.

Este trabalho abre pressuposto para desenvolvimento de futuras pesquisas que possam vir a aprofundar e ampliar a abrangência do método aplicado neste estudo para diversas outras bacias hidrográficas, desenvolvendo o acervo tecnológico dos recursos hídricos e a pesquisa neste âmbito.

Por fim, conclui-se que os métodos utilizados se apresentaram satisfatórios e, portanto, possíveis de aplicação.

5 AGRADecIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Em adição, agradece-se ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Sergipe pela estrutura física e oportunidade.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; DELGADO, R. C.; RODY, Y. P.; OLIVEIRA, A. S.; LEITE, F. P. Índice de Área Foliar de Eucalyptus Estimado por Índices de Vegetação Utilizando Imagens TM - Landsat 5. **Floresta Ambient.** vol.22 no.3 Seropédica jul./set. 2015.
- ALMEIDA, N. V.; CUNHA, S. B.; NASCIMENTO, F. R. A cobertura vegetal e sua importância na análise morfodinâmica da bacia hidrográfica do rio Taperoá – Nordeste do Brasil/Paraíba. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.3, N.4, p. 365-378, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Disponível em: <<http://portalsnirh.ana.gov.br/>>. Acesso em: set. de 2018.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, D. R.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, 1st edn.** United Nations, FAO: Rome. <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf>. Acesso em: 01 Jul 2018.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J. L. et al. (2013). **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728.
- AMARAL, G. D.; SILVA, V. L.; REIS, E. A. **Análise de Regressão Linear no Pacote R.** Relatório Técnico. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- ANDRADE, E. M.; PORTO, M.M.; COSTA, R. N. T.; MEIRELES, M.; C. NETO, J. A. Regionalização de modelos de vazões médias de longo período para o Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Vol. 35, Número Especial, P. 139 - 148, 2004.
- BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, vol. 24, n. 3, p. 612-624, set./dez. 2004.
- BARBOSA, S. E. S.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q.; CAMPOS, E. N. B.; VANESSA DE CARVALHO RODRIGUES, V. C. **Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais.** Eng. Sanit. Ambient. Vol.10 - nº 1 - jan/mar, 64-71, p. 2005.
- BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. I da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 9 jan. 1997.
- BRITO, M. C. M. **Qualidade da água para irrigação na bacia do rio itapicurú e risco de salinização no projeto de irrigação Ponto Novo – BA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Manejo da Irrigação) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas - Bahia, 2007.
- BOOKER, D. J.; SNELDER, T. H. Comparing methods for estimating flow duration curves at ungauged sites. **Journal of Hydrology**, v. 434-435, p.78-94, 2012.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. **Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográficas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.7, n. 3. p. 43-51, 2002.

CPRM. 2002. **Relatório síntese do trabalho de regionalização de vazões da sub-bacia 59**. São Paulo. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/rehi/regionalizacao/sint_reg59.pdf > Acesso em 11 de janeiro de 2019.

CRA – Centro de Recursos Ambientais da Bahia. **Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru**. Salvador: 2001.

GALILI, T. **Hybrid hierarchical k-means clustering for optimizing clustering outputs – Unsupervised Machine Learning**. 2016. Disponível em: < <https://www.r-bloggers.com/>>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.

ELETRÔBRÁS: Centrais Elétricas Brasileiras. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, v. 2, 1985.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr>>. Acesso em 16 de dezembro de 2018.

EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA. **Sistema de análise temporal da vegetação: SATVeg**. Campinas, 2016.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A.; SANTOS, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.6, n.2, p.81-105, 2001.

GAMEIRO S.; TEIXEIRA C.P.B.; SILVA NETO T.A.; LOPES M.F.L.; DUARTE C.R.; SOUTO M.V.S.; ZIMBACK C.R.L. 2016. **Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE**. Terræ, 13(1-2):15-22.

GOMES, E. P.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Regionalization of precipitation with determination of homogeneous regions via fuzzy c-means. **Brazilian Journal of Water Resources - RBRH**, Porto Alegre, v. 23, e51, 2018.

GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. 2006. **Regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do Estado de Santa Catarina**. Instrumento de gestão de recursos hídricos para o Estado de Santa Catarina. Florianópolis, vol. 1, revisão 0/B, 2006.

GOYAL, M. K.; GUPTA V. Identification of Homogeneous Rainfall Regimes in Northeast Region of India using Fuzzy Cluster Analysis. In: **Water Resour Manage**. 2014.

GPRH - Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV, IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM. 2012. 415p.

INEMA: Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Itapicuru**. Disponível em: < <http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/comites-de-bacias/comites/cbh-itapicuru>>. Acesso em: 03 set. 2018.

IBGE. (2011) – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 03 set. 2018.

KITE, G. W. **Frequency and Risk Analyses in Hydrology**. 5. ed. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications. 1988. 257p.

LATUF, M. O. **Modelagem hidrológica aplicada ao planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio acre**. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Presidente Prudente – SP, 2011.

LIMA, K. C. **O holoceno superior na bacia do rio Itapicuru (Bahia/Brasil): proposição de cenário para o baixo curso e planície costeira**. Tese de doutorado (Análise Ambiental e Dinâmica Territorial). Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, 2017.

LINDEN, R. Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, n. 4, p. 18-36, 2009.

LOPES, T. R.; PRADO, G; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J; ANTONIEL, L. S. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí - PR. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 1, p. 188-201, 2016.

MALEKINEZHAD, H.; NACHTNEBEL, H. P.; KLIK, A. Comparing the index-flood and multiple-regression methods using L-moments. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 36, p. 54-60, 2011.

MENDES, L. A.; SCHNEIDER, E. H. M. Avaliação da disponibilidade hídrica sazonal nas bacias dos rios Real, Piauí e Sergipe a partir da regionalização de vazões. In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília - DF, 2015, 8p.

MESTRINHO, S. S. P. Diagnóstico ambiental associado à qualidade dos Recursos hídricos na bacia do rio Itapicuru, estado da Bahia, BRASIL. In: **XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Salvador – BA, 2008, 20p.

MORAIS, F. **Infiltração – Uma variável geomorfológica**. Universidade Federal do Tocantins – Porto Nacional. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/viewFile/3753/4389>. Acesso em: 04 de agosto de 2018.

MORAES, M. B. C. **Análise Multivariada Aplicada à Contabilidade**. Notas de Aula. Mestrado e Doutorado em Controladoria e Contabilidade – USP, 2016.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

PARRACHO, A. C.; ROCHA, M. G. P.; ROCHA, A. Regionalization of precipitation for the

Iberian Peninsula and climate change. In: **Physics and Chemistry of the Earth**, 2015.

NERC. **Flood studied report**. London, 1975, 50.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183 p.

PEREIRA, L. A. **Regionalização de vazões de permanência aplicada na região hidrográfica do Uruguai utilizando o programa SisCoRV**. Monografia (Engenharia Ambiental), Curso de Engenharia Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

PESSOA, F. C. L. **Desenvolvimento de Metodologia para Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões na Amazônia Legal**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, Universidade Federal do Pará – UFP, Belém, 2015.

PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F. 2012. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**. V.1, nº1, pg 51-59.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; KOETZ, M. **Estudo da vazão em cursos d'água. Viçosa: Engenharia na Agricultura**. Caderno didático: 43. Associação de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2006. 151 p.

PURIFICAÇÃO, C. G. C.; SOARES, R. S.; JESUS, M. H.; SALLES, L. Q.; GONÇALVES, T. S. Hidrogeologia da bacia hidrográfica do rio Itapicurú – BA, como subsidio para o plano diretor de bacias. **XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, Campinas – SP, 2016.

QGIS Development Team, 2019. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Available at: <Available at: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

R CORE TEAM. **R. A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Available at: <Available at: <http://www.R-project.org>>. Acesso em: 06 de setembro de 2018.

RADAMBRASIL, Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SC. 24/25 Aracaju/Recife: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra**. Rio de Janeiro, 1983. 624p.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. **Journal of Hydrology**, v. 318, n. 1-4, p. 57-79, 2006.

RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by hybrid cluster analysis. **Journal of Hydrology**, v. 318, n. 1-4, p. 37-56, 2006.

REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2013.

REIS Jr., D. S. **Flood frequency analysis employing bayesian regional regression and imperfect historical information**. Tese (Ph. D. thesis) - Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, New York, 2005.

ROCHA, R. V.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. Análise da relação entre evapotranspiração potencial e precipitação e do seu impacto nas vazões simuladas pelo modelo smap no Estado do Ceará. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH**, Florianópolis – SC, 2017.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **3rd ERTS Symposium**, NASA SP-351 I. Washington, D.C.: NASA; 1973. 309–317.

RPGA da Bacia do Rio Itapicurú. **Programa Monitora: Programa de Monitoramento das Águas do Estado da Bahia**. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2018.

SANTOS, et al. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. In: **Atmospheric Science Letters**. Let.16, p. 185-192, setembro/2014.

SREEDEVI, P. D. et al. Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. **Journal Geological Society of India**, v. 73, n. 4, p. 543-552, 2009.

SILVA, A. C. G. **Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas por agrupamento fuzzy c-means no Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2018, 90 f.

SILVA, E. S.; FONTES, A.S. Importância ecológica do comportamento hídrico do rio Itapicuru no semiárido baiano. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH**, Florianópolis – SC, 2017.

SOUSA, H. T. de. **Sistema computacional para regionalização de Vazões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009. 86 f.

SRINIVAS, V. V.; TRIPATHI, S.; RAO, A. R.; GOVINDARAJU, R. S. Regional flood frequency analysis by combining self-organizing feature map and fuzzy clustering. **Journal of hydrology**. v. 348, p. 148-166, 2008.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA (SEI). **Uso atual das terras: Bacias dos Rios Itapicuru, Vaza-Barris e Real**. Salvador - BA, 2006. 115p.

TONGAL, H.; DEMIREL, M. C.; BOOIJ, M. J. Seasonality of low flows and dominant processes in the Rhine River. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.27, p.489-503, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre, Ed. ABRH, p. 944, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Universidade /UFRGS, 2002.

TUCCI, C. E. M. et al. 2012. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

VALVERDE, A. E. L. **Regionalização de chuvas intensas para a bacia do rio Doce**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2001.

VASCO, A. N. **Indicadores de Alteração Hidrológica: o declínio das vazões no baixo rio São Francisco**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2015.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. Quantificação de Componentes de Vazão por Meio de Filtros Recursivos: estudo de caso para a Bacia do Rio Paracatu (SF-7), Brasil. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 13, p. 3 – 24, 2013.

VEIGA, A. M.; MELO, D. C. R.; MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D. Métodos de regionalização de vazões em cotas baixas de referência para o rio Teles Pires na bacia amazônica. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH**, Maceió – AL, 2011.

VIRÃES, M. V. **Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50 – Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japaratuba, Subaúma e Jacuípe**. Recife: CPRM, 2013.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644–2659, 2016.